Flottation sous pression pour la clarification primaire et secondaire

85-6488/

RAPPORTS DE RECHERCHES SUR LES EAUX USÉES

Ces RAPPORTS DE RECHERCHES donnent les résultats des projets de recherches et de mises au point dans les domaines de la collecte, du traitement et de l'évacuation des eaux usées domestiques et municipales. Les projets sont identifiés et mis au point par l'intermédiaire du Comité interministériel de la collecte et du traitement des eaux usées (Comité de recherche SCAT) avec l'aide technique d'Environnement Canada.

Pour obtenir des renseignements concernant le Programme de recherche sur les techniques relatives aux eaux usées, s'adresser à:

Division de la recherche technique
Secteur de la recherche et de l'élaboration de propositions
Société canadienne d'hypothèques et de logement
Chemin Montréal
Ottawa (Ontario)
K1A 0P7

FLOTTATION SOUS PRESSION POUR LA CLARIFICATION PRIMAIRE ET SECONDAIRE

par

J.G. Henry et R. Gehr
Département du génie civil
Université de Toronto

pour la

Société canadienne d'hypothèques et de logement

Rapport SCAT-9F

On peut se procurer ce document aux endroits suivants:

Section des publications (eau)
Service de la protection de l'environnement
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 1C8

Centre de l'information et des communications
Société canadienne d'hypothèques et de logement
Chemin Montréal
Ottawa (Ontario)
K1A 0P7

AVIS

Ce projet a été réalisé pour le compte du Secteur de la recherche et de l'élaboration de propositions de la Société canadienne d'hypothèques et de logement, grâce à une subvention accordée en vertu de la Partie V de la Loi nationale sur l'habitation. L'orientation et l'assistance technique ont été apportées par M.H. Campbell d'Environnement Canada.

La Société canadienne d'hypothèques et de logement a révisé ce rapport. Les opinions, les conclusions et les recommandations exprimées dans le présent chapitre sont celles de l'auteur et ne reflètent pas nécessairement les opinions et les politiques de la Société ou d'Environnement Canada. La mention de noms de marques de commerce ou de produits disponibles sur le marché ne constitue pas une adhésion ou une recommandation aux fins d'utilisation.

Édition française du rapport SCAT-9, "Dissolved Air Flotation for Primary and Secondary Clarification".

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1982
N° de cat. En 43-51 9F
ISBN 0-662-91792-8
IMPRIMERIE BEAUREGARD LIMITÉE

RÉSUMÉ

Une étude bibliographique de plus de 60 références sur la flottation sous pression pour le traitement de l'eau et des eaux usées a révélé que, sauf pour l'épaississement par flottation, on possédait très peu de renseignements sur la flottation sous pression comme moyen de rechange à la décantation.

Dans l'étude qui a été réalisée par la suite, des dispositifs de flottation sous pression, de laboratoire fonctionnant en discontinu, et à l'échelle-pilote fonctionnant en continu, ont servi à clarifier l'effluent brut et la liqueur mixte d'une unité d'aération prolongée et d'une usine d'épuration par boues activées fonctionnant sous des charges ordinaires. On a comparé, à des fins d'extrapolation, les paramètres de fonctionnement (tels que la teneur en matières en suspension dans l'effluent et le floc, le rapport air/matières solides et un paramètre d'épaississement) des dispositifs fonctionnant en continu et en discontinu. On a aussi comparé le fonctionnement de la flottation sous pression lors de la clarification des trois types d'effluents.

Les tests en discontinu ont permis de prévoir le comportement de la flottation sous pression à l'échelle. Les études en unité-pilote ont montré que les matières solides, dans les eaux brutes et dans la liqueur mixte, peuvent être séparées par flottation sous pression, selon un taux comparable à celui de la décantation.

On a élaboré les critères du calcul des unités de flottation sous pression pour chacun des trois effluents traités et on a estimé les coûts de la décantation primaire et secondaire dans des usines municipales de 4 500, 45 000 et 227 000 m^3/j par flottation sous pression. Du point de vue économique, la flottation sous pression ne peut concurrencer la décantation conventionnelle et ne devrait être envisagée que lorsque l'espace coûte très cher, que les coûts du terrain sont élevés ou que le foisonnement des boues l'exige.

ABSTRACT

A literature survey of over 60 references on the use of dissolved air flotation (DAF) in water and wastewater treatment revealed that, except for flotation thickening, very little information was available on DAF as an alternative to sedimentation.

In this study, bench-scale batch and pilot-scale continuous flow dissolved air flotation units were used to clarify raw sewage and mixed liquor from an extended aeration and a conventionally loaded activated sludge plant. Performance parameters, such as effluent and float suspended solids, air to solids ratio, and a "thickening parameter", of the batch and continuous flow units were compared for scale-up purposes. Comparisons were also made between the performances of the DAF unit when clarifying the three types of feed.

The research indicated that batch flotation tests were valuable in predicting full-scale DAF performance. The pilot studies showed that the solids in raw sewage and in the mixed liquor from extended aeration or conventional activated sludge plants could be separated by DAF with efficiencies comparable to those reported for sedimentation.

Design criteria for DAF units for each of the three feeds were developed and the costs of utilizing DAF for primary and secondary clarification in municipal plants of 4 500, 45 000 and 227 000 m^3/d capacity were estimated. From an economic point of view, it was found that DAF was not competitive with sedimentation and should only be considered when space is at a premium, land costs are high or when bulking sludges necessitate its use.

TABLE DES MATIÈRES

		Page
RÉSUMÉ		i
SOMMAIRE		xiv
1	INTRODUCTION	1
2	OBJECTIFS ET LIMITES DE L'ÉTUDE	2
3	ÉTUDE DE LA DOCUMENTATION ET REVUE DE L'ÉQUIPEMENT DISPONIBLE	4
3.1	Introduction	4
3.2	Bref historique	5
3.3	Théorie	6
3.4	Études en laboratoire	8
3.5	Études aux usines pilotes	11
3.5.1	Les eaux d'égouts	11
3.5.2	Boues activées provenant de sources domestiques	12
3.5.3	Eaux usées industrielles	13
3.5.4	Eaux brutes	15
3.6.	Installations à l'échelle	16
3.6.1	Eaux d'égouts	16
3.6.2	Boues activées provenant de sources domestiques	17
3.6.3	Eaux usées industrielles	19
3.6.4	Eaux brutes et élimination des traces d'impuretés dans l'effluent	20
3.7	Comparaison entre la décantation et la flottation	20
3.8	Coûts afférents à la flottation	21
3.9	Recherches en cours	24
3.10	Documentation des fabricants	26
4	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET APPAREILS	29
4.1	Trois phases	29
4.2	Équipement propre aux trois phases	29
4.2.1	Unité de flottation sous pression de laboratoire fonctionnant en discontinu	29
4.2.2	Unité pilote de flottation sous pression fonctionnant en continu	31
4.2.3	Équipement auxiliaire	31
4.2.4	Études avec colorants	34
4.2.5	Essais de floculation	34
4.3	Phase 1 (Aération prolongée)	35
4.3.1	Équipement propre à cette étape	35
4.3.2	Contraintes	37
4.3.3	Essais de floculation	37

		Page
4.3.4	Essais de flottation en discontinu	37
4.3.5	Tests pilotes	38
4.4	Phase 2 (eaux d'égouts)	40
4.4.1	Équipement propre à cette phase	40
4.4.2	Contraintes	40
4.4.3	Essais de floculation	40
4.4.4	Essais de flottation en fonctionnement discontinu	40
4.4.5	Tests pilotes	42
4.5	Phase 3 (Épuration ordinaire par boues activées)	42
4.5.1	Équipement propre à cette phase	42
4.5.2	Essais de floculation	45
4.5.3	Essais de flottation en fonctionnement discontinu	45
4.5.4	Tests pilotes	45
5	RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES ET DISCUSSION - PHASE 1 (Aération prolongée)	48
5.1	Essais de floculation	48
5.2	Essais de flottation en fonctionnement discontinu	48
5.2.1	Détermination du rapport A/MS optimal	48
5.2.2	Choix du polymère	51
5.2.3	Dose optimale du polymère	52
5.2.4	Effets des agents de déphosphoration (conjointement avec le polymère choisi) sur les essais de flottation en fonctionnement discontinu	52
5.2.5	Effets du $FeCl_3$ sur la flottation en fonctionnement discontinu, sans polymère	55
5.3	Exploitation de l'usine pilote	56
5.3.1	Système de contrôle du niveau	57
5.3.2	Éjecteur et système de réaération	58
5.3.3	Soupape de contrôle du liquide recirculé	60
5.3.4	Addition du polymère	60
5.3.5	Mesures de l'oxygène dissous	60
5.3.6	Fonctionnement de l'écumoire	61
5.3.7	Curage des bassins	61
5.4	Résultats des tests à l'usine pilote	61
5.4.1	Commentaires généraux	61
5.4.2	Variation du rapport A/MS	63
5.4.3	Addition du produit chimique	63
5.4.4	Comparaison du comportement avec et sans $FeCl_3$	63
5.4.5	Extrêmes	65
5.4.6	Résumé des valeurs afférentes au fonctionnement et résultats des tests	65
5.5	Mise à l'échelle	67
5.6	Facteurs économiques afférents à la flottation de la liqueur mixte en aération prolongée	69

		Page
6	RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES ET DISCUSSION - PHASE 2 (eaux d'égouts brutes)	71
6.1	Essais de floculation	71
6.2	Essais de flottation en fonctionnement discontinu	71
6.2.1	Détermination du rapport A/MS optimal	71
6.2.2	Choix du polymère	73
6.2.3	Dose optimale du polymère	73
6.2.4	Comparaison des liquides recirculés	75
6.2.5	$FeCl_3$ par rapport d'alun (sans polymère)	77
6.2.6	Interaction $FeCl_3$/Percol 757	79
6.3	Fonctionnement de l'usine pilote	79
6.4	Résultats des tests à l'usine pilote	80
6.4.1	Introduction	80
6.4.2	Concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent par rapport au A/MS	82
6.4.3	Concentration de phosphore total et de matières solides en suspension dans l'affluent et l'effluent	82
6.4.4	Coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS et paramètre d'épaississement	89
6.4.5	Réduction de la DCO	89
6.4.6	Comportement prévu	95
6.5	Mise à l'échelle	95
6.6	Facteurs économiques afférents à la flottation des eaux d'égouts	98
7	RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES ET DISCUSSION - PHASE 3 (Épuration ordinaire par boues activées)	100
7.1	Essais de floculation	100
7.2	Essais de flottation en fonctionnement discontinu	100
7.2.1	Détermination du rapport A/MS optimal	100
7.2.2	Sélection du polymère	103
7.2.3	Détermination de la dose optimale du polymère	103
7.2.4	Effets de l'addition du $FeCl_3$	103
7.3	Fonctionnement de l'usine pilote	104
7.4	Résultats des tests à l'usine pilote	106
7.4.1	Analyse du groupe d'expériences factoriel fractionnel	106
7.4.2	Analyse graphique des résultats	110
7.4.3	Comparaison de l'analyse statistique et graphique	117
7.4.4	Équilibre des matières solides	118
7.4.5	Comportement attendu	119
7.5	Mise à l'échelle	119
7.6	Facteurs économiques afférents à la flottation de la liqueur mixte provenant de l'usine d'épuration par boues activées	120

		Page
8	COMPARAISONS DES COMPORTEMENTS ET DES COÛTS	124
8.1	Dispositifs de flottation sous pression en fonctionnement discontinu et continu	124
8.2	Comportement à l'usine pilote	125
8.3	Comparaison des coûts	127
REMERCIEMENTS		129
BIBLIOGRAPHIE		130
ANNEXE A	SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS	135
ANNEXE B	MESURES DE L'AIR DISSOUS	139
ANNEXE C	RÉSUMÉ DES ÉTUDES EFFECTUÉES AVEC LE TRACEUR	151
ANNEXE D	RÉSULTATS DES ESSAIS DE FLOCULATION	157
ANNEXE E	ÉCHANTILLON DE CALCULS ET APPLICATION DU PARAMÈTRE D'ÉPAISSISSEMENT ET DE L'ÉQUATION D'ÉPAISSISSEMENT	163
ANNEXE F	RÉSUMÉ DES POLYMÈRES UTILISÉS	173
ANNEXE G	RÉSULTATS DES TESTS EN DISCONTINU	177
ANNEXE H	RÉSULTATS DES TESTS À L'USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION	185
ANNEXE I	ANALYSE DU PLAN FACTORIEL USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 3	193
ANNEXE J	CALCULS PORTANT SUR L'ÉQUILIBRE DES MATIÈRES SOLIDES, USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 3	203
ANNEXE K	ESTIMATION DES COÛTS	207

LISTE DES FIGURES

		Page
1	UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION DE LABORATOIRE FONCTIONNANT EN DISCONTINU	30
2	DIAGRAMME DE L'USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION FONCTIONNANT EN CONTINU	32
3	DIAGRAMME DE L'ÉCOULEMENT INTERNE, UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION SR 15 DE KOMLINE-SANDERSON	33
4	USINE PILOTE À AÉRATION PROLONGÉE	36
5	FLOC ET MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, SANS POLYMÈRE, DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1	49
6	COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS - DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1	50
7	EFFET DU POLYMÈRE AJOUTÉ SUR LE FLOC ET LES MATIÈRES SOLIDES DANS L'EFFLUENT, DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1	53
8	ADAPTATION DES SOUPAPES POUR LE NETTOYAGE DE L'ÉJECTEUR, USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION	59
9	FLOC PAR RAPPORT AU A/MS. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1	64
10	COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC TOUS LES REPÈRES. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 1	64
11	MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2	72
12	CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, AUCUNE ADDITION. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	83
13	CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC ADDITION D'UN POLYMÈRE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	84

		Page
14	CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC ADDITION DE $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	85
15	CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC ADDITION DU POLYMÈRE ET DE $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	86
16	GRAPHIQUE DES PROBABILITÉS POUR LA VARIATION DU PARAMÈTRE D'ÉPAISSISSEMENT. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	90
17	COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AUCUNE ADDITION. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	91
18	COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC POLYMÈRE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	92
19	COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	93
20	COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC POLYMÈRE ET $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	93
21	MATIÈRES SOLIDES DANS L'EFFLUENT ET LE FLOC PAR RAPPORT AU A/MS, SANS POLYMÈRE. PHASE 3	101
22	COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, SANS POLYMÈRE. UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU. PHASE 3	102
23	COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, SANS PRODUIT CHIMIQUE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3	112
24	COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC LE PRODUIT CHIMIQUE ET LE POLYMÈRE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3	112
25	MATIÈRES SOLIDES FLOTTANTES PAR RAPPORT À LA DOSE DU POLYMÈRE POUR TOUS LES A/MS ET LES DÉBITS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3	115

		Page
26	CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT À LA DOSE DU POLYMÈRE, AVEC LE PRODUIT CHIMIQUE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3	116
27	CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT À LA DOSE DU POLYMÈRE, SANS PRODUIT CHIMIQUE, POUR TOUS LES A/MS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3	116

LISTE DES TABLEAUX

		Page
1	CRITÈRES AFFÉRENTS À LA TECHNIQUE DE FLOTTATION SOUS PRESSION ET COMPORTEMENT PRÉVU AVEC L'UTILISATION D'ADJUVANTS DE FLOCULATION	27
2	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS DE LA VARIATION DU RAPPORT A/MS	39
3	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS DU PRODUIT CHIMIQUE AJOUTÉ - PHASE 1 USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION	39
4	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS DES CHARGES IMPOSÉES AU SYSTÈME DE FLOTTATION SOUS PRESSION PHASE 1 - USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION	41
5	DOSES DU PRODUIT CHIMIQUE ET DU POLYMÈRE POUR ÉTUDIER LES EFFETS INTERACTIFS. UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2	43
6	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT. AUCUNE ADDITION - USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	43
7	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS ENTRAÎNÉS PAR L'ADDITION DU POLYMÈRE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	43
8	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER L'EFFET ENTRAÎNÉ PAR L'ADDITION DU PRODUIT CHIMIQUE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	44
9	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS ENTRAÎNÉS PAR L'ADDITION DU POLYMÈRE ET DU PRODUIT CHIMIQUE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	44
10	DOSES DU PRODUIT CHIMIQUE ET DU POLYMÈRE POUR ÉTUDIER LES EFFETS D'INTERACTION. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 3	46

		Page
11	PLAN FACTORIEL FRACTIONNEL. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3	47
12	EFFETS DU PRODUIT CHIMIQUE AJOUTÉ SUR LA FLOTTATION EFFECTUÉE AVEC UN POLYMÈRE. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1	54
13	EFFET DU $FeCl_3$ SUR LA FLOTTATION RÉALISÉE SANS POLYMÈRE. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1	56
14	RÉSULTATS SUR LE FONCTIONNEMENT. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 1	62
15	COMPORTEMENT DE LA FLOTTATION, AVEC OU SANS $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 1	65
16	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT RECOMMANDÉES, MOYENNES ET EXTRÊMES ET RÉSULTATS DES TESTS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 1	66
17	FLOTTATION DE LA LIQUEUR MIXTE PROVENANT DE L'USINE D'ÉPURATION À AÉRATION PROLONGÉE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 1	67
18	COMPARAISON DU COMPORTEMENT AVEC LE DISPOSITIF EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU ET À L'USINE PILOTE - PHASE 1	68
19	COMPARAISON DES COÛTS: AÉRATION PROLONGÉE	70
20	EFFET DE L'ADDITION DU POLYMÈRE (PERCOL 757). DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2	74
21	COMPARAISON DES LIQUIDES RECIRCULÉS. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2	76
22	EFFETS DU $FECl_3$ ET DE L'ALUN SUR LA FLOTTATION. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2	78

		Page
23	COMBINAISON DU PRODUIT CHIMIQUE ET DU POLYMÈRE. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2	80
24	RAPPORT A/MS MINIMAL POUR LA CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT POUR LES QUATRE TESTS EXPÉRIMENTAUX. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	87
25	RÉSUMÉ DES PROBABILITÉS CONCERNANT L'ÉLIMINATION DU PHOSPHORE TOTAL ET DES MATIÈRES SOLIDES DANS LES EAUX D'ÉGOUTS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	88
26	RÉSUMÉ SUR LE FLOC TOTAL ET LE RAPPORT A/MS ET COMPARAISON STATISTIQUE ENTRE LE PE ET LA PENTE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	94
27	RÉSUMÉ DE LA RÉDUCTION DE LA DCO. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	95
28	RÉSUMÉ DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT RECOMMANDÉES ET RÉSULTATS PRÉVUS POUR LE COMPORTEMENT. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	96
29	COMPARAISON ENTRE LE COMPORTEMENT AVEC L'UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU ET L'USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2	97
30	COMPARAISON DES COÛTS: EAUX D'ÉGOUTS	99
31	DÉTERMINATION DE LA DOSE OPTIMALE DU POLYMÈRE (PERCOL 728). TESTS EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU. PHASE 3	104
32	EFFET DE L'ADDITION DE $FeCl_3$, UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 3	105
33	EFFETS ET INTERACTIONS IMPORTANTS, USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3	108
34	ANALYSE DE L'ÉPAISSISSEMENT, COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3	111

		Page
35	RÉSUMÉ RELATIF À LA FLOTTATION DE LA LIQUEUR MIXTE PROVENANT D'UNE USINE D'ÉPURATION ORDINAIRE PAR BOUES ACTIVÉES. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3	120
36	COMPARAISON DU COMPORTEMENT DE LA FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU ET À L'USINE PILOTE - PHASE 3	121
37	COMPARAISON DES COÛTS: BOUES ACTIVÉES	123
38	RÉSUMÉ DU COMPORTEMENT À L'USINE PILOTE	126
39	COMPARAISON DES COÛTS: FLOTTATION C. DÉCANTATION	128

SOMMAIRE

Le travail qui a été effectué et les résultats qui ont permis de tirer des conclusions générales sont décrits brièvement ci-dessous.

1) Travail effectué par d'autres. En Amérique du Nord, les recherches sur la flottation sous pression et son application dans le domaine de l'épuration des eaux usées des municipalités se sont concentrées presque entièrement sur l'épaississement des boues activées par flottation. Seul un cas d'utilisation de flottation aux fins de décantation secondaire a été rapporté. Cependant, plusieurs rapports sur la flottation des eaux usées brutes ont indiqué des résultats favorables.
Au Royaume-Uni, en plus de l'application de l'épaississement par flottation des boues activées, des recherches considérables et des installations locales ont prouvé que la décantation des eaux usées brutes était une réussite. La microflottation et l'électroflottation sont les deux concepts qui reçoivent le plus d'attention en Europe continentale où l'intérêt est centré sur le traitement d'eaux de boisson ou leur utilisation aux fins industrielles.
L'application de la flottation sous pression comme solution de rechange à la décantation a atteint un stade avancé en Afrique du Sud où des soumissions ont été appelées sur place pour l'installation d'unités de flottation sous pression, à la place d'unités de décantation secondaire, dans une usine d'une capacité des 150 000 m^3/j.
Les fabricants qui produisent les unités de flottation sous pression standards en Amérique du Nord comprennent Komline-Sanderson, Eimco-Envirotech et Rexnord. Les fabricants qui offrent des unités de conception inusitée comprennent: ICI (CIL au Canada) qui présente le processus en puits profond (microflottation); Ingersoll Rand, avec le dispositif en fonctionnement à contre-courant; et Permutit qui offre le dispositif lamellaire. Chacune de ces méthodes uniques est recommandée dans des situations spécifiques.

2) Test en laboratoire. Une unité de traitement sous pression à trois réservoirs de laboratoire a été mise au point en se basant sur un modèle qui a fait l'objet d'un rapport de Wood en 1970. L'unité utilisée dans la présente étude comprenait un indicateur d'oxygène dissous qui relevait les concentrations d'air sous des pressions élevées. L'opération était simple et l'appareil permettait d'effectuer une présélection des produits chimiques destinés au traitement des eaux usées et des paramètres de fonctionnement réalistes pour l'unité pilote.

3) Mise à l'échelle du processus. Une comparaison des tests en laboratoire (fonctionnement en discontinu) avec l'unité pilote (fonctionnement en continu) pour les trois phases de l'étude donnait des valeurs semblables pour le rapport air/matières solides, la dose du polymère et la concentration du floc. Cependant, dans ces trois cas, un meilleur effluent a été obtenu à l'usine pilote fonctionnant en continu. En dépit des opinions selon lesquelles la pression affecte le comportement de la flottation, les tests en laboratoire n'ont montré aucun effet mesurable, et l'influence des pressions différentes entre l'unité de laboratoire et celle à l'échelle pilote peut être prise en considération lors de l'analyse des paramètres de fonctionnement utilisés (voir 5 ci-dessous). Par conséquent, aucun facteur n'a été nécessaire lors de l'utilisation de ces paramètres pour la mise à l'échelle.

4) Additifs pour la flottation. Vingt-cinq polymères provenant de trois fabricants ont été mis à l'essai en laboratoire et le plus approprié a été choisi pour chacune des phases du projet en se basant sur le rendement et le coût. Les effets de trois agents de déphosphoration (la chaux, l'alun et le chlorure ferrique) ont été évalués en laboratoire. On n'a observé aucune détérioration dans le comportement de la flottation; en fait, le chlorure ferrique ajouté au processus d'épuration ordinaire par boues activées a amélioré la flottation.

5) Évaluation du processus. On s'est aperçu que les paramètres utilisés habituellement pour évaluer le comportement de la flottation, c'est-à-dire la concentration des matières solides dans l'effluent et le floc, le rapport air/matières solides, n'avaient, dans bien des cas, aucune relation entre eux. On a mis au point un "paramètre d'épaississement" ou "équation d'épaississement" pour mieux mesurer l'épaississement en tenant compte de la concentration des matières solides dans l'effluent et du floc et de l'air nécessaire. Ces deux paramètres sont aussi très utiles pour prédire les besoins en air lors d'une exploitation à l'échelle.

6) Problèmes de fonctionnement. Le coeur d'une unité de flottation sous pression est le système de dissolution de l'air. Pour avoir un bon rendement à l'usine, il est important que ce système fonctionne bien et il nécessite donc beaucoup d'attention. Le reste de l'équipement mécanique (pompes, mélangeurs, écumoires, etc.) doit être entretenu régulièrement; si cet entretien est effectué, ces composants fonctionneront toujours bien. Les éjecteurs d'air avaient tendance à se boucher et le système de contrôle du niveau du réservoir sous pression fonctionnait mal lorsque la qualité de l'effluent (et par conséquent la qualité du liquide recirculé) diminuait. Ce

problème s'est avéré plus sérieux durant la phase 1 (aération prolongée) et la phase 3 (épuration ordinaire par boues activées) à cause de la nature floculante de la boue qui entrait. D'un autre côté, les eaux usées brutes ont créé moins de problèmes durant la phase 2, et le système a fonctionné durant plusieurs heures avec un effluent médiocre. Ainsi, contrairement à ce à quoi on s'attendait, le fonctionnement de l'usine était plus fiable lorsque des eaux usées brutes étaient utilisées.

L'usine fonctionnait plus facilement avec des eaux usées brutes pour une autre raison: il a été démontré qu'il était préférable mais non nécessaire d'ajouter des polymères; l'usine pouvait fonctionner adéquatement sans polymère, bien que la qualité de l'effluent fusse plus irrégulière. Par conséquent, durant la phase 2, l'usine ne dépendait pas totalement du polymère, alors que durant les phases 1 et 3, l'ajout du polymère s'est avéré nécessaire.

Enfin, à cause de la faible charge de matières solides dans la phase 2, l'accumulation du floc a été négligeable et aucun floc n'a été transporté dans l'effluent. Le cycle d'écumage n'a pas pu être réglé de façon à ce qu'un voile de floc se forme à cause de problèmes de moussage. Ce voile peu épais de floc n'a pas donné une faible concentration de flocs, bien que l'épaississement était de courte durée.

En résumé, l'opération la plus simple et la plus fiable a été réalisée avec les eaux usées brutes.

7) Estimation des coûts. L'utilisation de la flottation au lieu de la décantation aux fins de séparation des matières solides dans les eaux usées brutes ou la liqueur mixte augmente de 1,5 à 4 fois les coûts en capital et de 20 fois les coûts d'exploitation, selon l'application et la capacité de l'usine. L'utilisation de la flottation au lieu de la décantation ne peut se justifier pour le traitement des eaux d'égouts des municipalités, que si les coûts de terrain sont élevés ou si l'espace disponible est limité.

8) Modifications du processus. Plusieurs modifications ont été apportées au dispositif de Komline-Sanderson pour améliorer son fonctionnement. Pour éliminer le colmatage dans le système de dissolution de l'air, on a installé un raccord de reflux dans le système de recirculation, permettant ainsi de nettoyer l'éjecteur lorsque le dispositif de flottation sous pression fonctionne. L'insertion d'une sonde de contrôle de l'oxygène dissous (d'un type pouvant mesurer l'oxygène sous une pression élevée) dans une ligne de dérivation a permis de déterminer avec précision la quantité d'air disponible. À cause de l'accumulation de boue flottante à charge massique élevée, il

a fallu améliorer l'opération de raclage de la boue. Pour y arriver, on a ajouté une chicane et une plage.

On n'a pas envisagé de modifications au dispositif de Komline-Sanderson comme l'ajout de systèmes de dissolution de l'air brevetés, de plaques inclinées, de tubes, etc. Les caractéristiques uniques de l'équipement des autres fabricants mettant en pratique certaines de ces idées sont indiquées dans le présent texte.

Conclusions

On a déterminé que la flottation sous pression était une solution de rechange pouvant être mise en pratique pour remplacer la décantation par gravité dans le traitement des eaux d'égout des municipalités, en termes de concentration des boues et de qualité de l'effluent. Cependant, les coûts en capital et d'exploitation afférents à la flottation sous pression sont extrêmement plus élevés que ceux afférents à une technique offrant un rendement équivalent et utilisant la décantation suivie de l'épaississement par flottation au besoin.

Lorsque la technique de flottation sous pression a été utilisée pour la clarification des eaux usées brutes, elle a produit une concentration de boues d'environ six pour cent et de matières solides en suspension dans l'effluent de 40 mg/L. Ces valeurs sont comparables à celles que l'on peut obtenir grâce à la décantation, pourvu que des agents chimiques pour le traitement des eaux usées soient ajoutés dans les deux cas. Bien que la charge hydraulique dans le cas de la flottation soit d'environ huit fois supérieure à celle de la décantation, les coûts en capital et d'exploitation sont approximativement trois à cinq fois supérieurs dans le cas de la flottation sous pression que dans le cas de la décantation (si on laisse de côté les coûts du terrain), selon la capacité de l'usine.

La clarification de la liqueur mixte effectuée dans une usine à aération prolongée grâce à la technique de flottation produit une qualité de l'effluent d'environ 15 mg/L, c'est-à-dire semblable à celle obtenue par décantation. Cependant, la concentration de quatre pour cent du floc obtenue par flottation sous pression est environ quatre fois plus élevée que celle obtenue dans un bassin de décantation terminale. Pour comparer les coûts sur une base équitable, l'épaississement par flottation devrait suivre la décantation par gravité. La charge hydraulique dans le cas de la flottation serait à peu près quatre fois supérieure à celle de la décantation, mais les coûts en capital seraient de deux à trois fois plus élevés et les coûts d'exploitation jusqu'à 18 fois plus élevés que ceux afférents à la décantation avec épaississement par flottation.

La clarification de la liqueur mixte effectuée dans une usine d'épuration par boues activées fonctionnant sous des charges ordinaires a produit des concentrations de boues et de matières solides dans l'effluent comparables à celles que l'on peut obtenir par décantation par gravité suivie d'un épaississement par flottation, c'est-à-dire 7,5 pour cent et 20 mg/L respectivement. Les charges hydrauliques dans le cas de la flottation peuvent être six fois plus élevées que celles pour la décantation, mais, ici encore, la comparaison des coûts favorise la décantation. Le rapport du coût en capital est 2:1 et du coût d'exploitation, aussi élevé que 20:1 pour une usine d'une capacité de 227 300 m^3/j.

Recommandations

Cette étude montre qu'il est pratiquement faisable de remplacer la décantation des eaux usées des municipalités par la flottation, mais c'est une solution difficile à justifier au point de vue économique. On recommande d'envisager la technique de flottation sous pression seulement lorsque les coûts du terrain sont élevés ou lorsque les boues résistent à la décantation par gravité. Cette technique semble prometteuse pour les usines qui sont aux prises avec le foisonnement périodique ou continu des boues. On a établi que la dégradation du substrat se fait plus rapidement par les micro-organismes filamenteux que par les zoolées plus répandues. Cependant, les micro-organismes filamenteux sont connus pour leur difficulté à les rendre compacts et sont responsables, dans de nombreux cas, du foisonnement des boues. Les eaux usées à haute teneur en hydrates de carbone (par exemple les produits de brasserie, les produits laitiers) ont particulièrement tendance à causer ce problème; il faudrait poursuivre les recherches sur la séparation par flottation de ces boues, probablement combinées avec les boues des municipalités.

1 INTRODUCTION

La séparation des matières solides du liquide est une partie importante de toutes les opérations sur le traitement des eaux usées et de l'eau brute. Traditionnellement, la décantation par gravité a été la méthode la plus populaire; cependant, la technique de flottation, ou l'inverse de la décantation, est de plus en plus utilisée aux fins de clarification.

La flottation se fera naturellement dans une suspension de matières solides/liquides, si la portion de matières solides a une densité inférieure à celle du liquide. Dans le cas contraire, la flottation est induite par la formation d'une agglomération d'air/matières solides dont la densité combinée est inférieure à celle du liquide. On peut créer des bulles d'air à l'aide de différentes techniques comme l'électrolyse, la photosynthèse, l'agitation physique ou en changeant la pression d'un liquide saturé d'air. Ce dernier effet peut s'obtenir en imposant des conditions sous vide au liquide soumis originalement à la pression atmosphérique ou en libérant la pression appliquée précédemment. La dernière méthode, connue sous le nom de flottation sous pression d'air dissous ou mieux encore flottation sous pression, est la plus utilisée dans le domaine de la technique sanitaire et représente la base de cette étude.

La technique de la flottation sous pression a été le plus souvent appliquée au cours des 20 dernières années pour l'épaississement de la boue activée. Comme on peut contrôler la force de flottabilité ou de poussée et la rendre plus importante que celle de la gravité, il est possible d'épaissir de plus grandes quantités de boues par flottation que par décantation par gravité dans le même temps. Cet avantage, en retour, permet d'économiser de l'espace et, dans certains cas, de réduire les coûts en capital. De plus, on peut obtenir une boue épaisse plus concentrée par flottation que par décantation par gravité.

À part son application pour l'épaississement des boues activées, la technique de flottation sous pression a été utilisée dans toutes les situations nécessitant la clarification, y compris le traitement des eaux brutes, le traitement des eaux d'égouts, l'élimination des traces d'impuretés dans l'effluent, l'épaississement des boues primaires et des boues activées et la clarification de la liqueur mixte. Le manque de renseignements sur l'utilisation de la technique de flottation sous pression pour la clarification de la liqueur mixte, en particulier dans le domaine du traitement des eaux usées domestiques, a incité ces recherches.

2 OBJECTIFS ET LIMITES DE L'ÉTUDE

Le premier objectif de cette étude a été de déterminer si en pratique il était possible d'utiliser la technique de flottation sous pression pour remplacer la technique de décantation par gravité dans le traitement des eaux d'égouts municipales. On a retenu les eaux d'égouts brutes et la liqueur mixte tamisée provenant des usines d'épuration municipales par boues activées fonctionnant sous deux charges différentes de matières organique/micro-organismes (MO/M). Il a été nécessaire d'élaborer les objectifs secondaires suivants, lesquels fourniront des renseignements utiles pour l'application de la technique de flottation sous pression dans des situations précises:

1) une évaluation des travaux effectués par d'autres chercheurs et par les fabricants de l'équipement de flottation sous pression;
2) la mise au point d'un test en laboratoire utile pour l'évaluation du rendement de la technique de flottation sous pression;
3) l'exploitation d'une unité de flottation sous pression à l'échelle pilote parallèlement avec les tests en laboratoire afin d'élaborer une méthodologie pour la mise à l'échelle;
4) l'examen de l'effet des agents de flottation et des agents de déphosphoration sur la flottation sous pression, les conditions optimales devant être déterminées en laboratoire et appliquées à l'échelle pilote;
5) l'évaluation de la technique en se basant sur la charge des matières solides et la charge hydraulique, le rapport air/matières solides et d'autres paramètres applicables au rendement et à l'évaluation de la technique;
6) la présentation sous forme de rapports et, au besoin, l'élimination des problèmes d'exploitation de la flottation sous pression qui se sont posés au cours de l'étude;
7) l'estimation des coûts en capital et d'exploitation afférents aux unités de flottation sous pression de diverses tailles et leur comparaison avec les coûts comparables afférents à la décantation par gravité;
8) la prise en considération de la possibilité d'apporter des modifications à la technique comme le suggèrent l'étude et les discussions avec les fabricants d'unités de flottation sous pression.

Il faut mentionner certaines limites afférentes à cette étude. À cause des eaux usées des municipalités (avec des concentrations de matières solides variées) qui ont

fait l'objet de tests à des débits d'arrivée constants, les effets de la charge hydraulique de choc ou des courants fluctuants sur cette technique n'ont pas été évalués. De même, comme un nombre limité de polymères et de produits chimiques ont été mis à l'essai et qu'un seul type d'unité de flottation sous pression a été utilisé, il faut utiliser les résultats avec discrétion dans les cas où les conditions réelles sont différentes de celles présentes durant cette étude. Enfin, la source des eaux d'égouts utilisée pour les trois phases (c'est-à-dire alimentation de l'usine d'épuration par boues activées pour les phases 1 et 3, et l'alimentation de l'unité de flottation sous pression durant la phase 2) était l'usine de traitement des déchets Skyway et Burlington. Cette usine épure surtout des eaux usées domestiques d'une population de 75 000 habitants. Par conséquent, il se peut que les résultats de cette étude ne s'appliquent pas aux eaux d'égouts qui ne sont pas semblables aux eaux d'égouts brutes tamisées de Burlington.

3 ÉTUDE DE LA DOCUMENTATION ET REVUE DE L'ÉQUIPEMENT DISPONIBLE

3.1 Introduction

La technique de la flottation appliquée au domaine du traitement des eaux usées et de l'eau brute provient des industries minières, métallurgiques et chimiques où elle est utilisée pour séparer les matières solides des liquides et les matières solides d'autres matières solides. La technique de la flottation est maintenant très répandue dans la purification des eaux usées et de l'eau brute. La présente étude s'est penchée sur une partie de ce domaine en expansion rapide, c'est-à-dire l'application de la technique de flottation sous pression pour la clarification et l'épaississement des eaux d'égouts brutes et de la liqueur mixte à partir de divers types de techniques d'épuration par boues activées. L'étude de la documentation s'est concentrée sur les documents propres au domaine à l'étude, mais, afin de la rendre plus complète, l'étude présente aussi brièvement les grandes variétés de techniques de base appliquées aux domaines du traitement des déchets et de l'eau.

En 1952, Laboon a présenté un rapport sur la concentration par flottation de boues fraîches et de boues activées causée par la production de gaz dans des conditions anaérobiques. Le contrôle des températures et des périodes de soumission a aussi aidé à cette réalisation. De nouvelles applications de la technique de flottation sous pression ont été rapportées par van Vuuren et al. (1968) et par Stander et van Vuuren (1970). Les effluents des bassins de décantation secondaire ont été traités dans la première étude et l'air destiné à la flottation passait par un canal Venturi et alimentait la conduite d'aspiration de la pompe d'alimentation. La deuxième étude s'est portée sur les conditions de sursaturation d'oxygène produites dans les étangs de maturation (avec l'activité des algues) pour effectuer la flottation.

La technique de l'électroflottation, dans laquelle des bulles de gaz sont produites grâce à des moyens électrolytiques, a été utilisée de façon périodique dans le domaine du traitement de l'eau et des eaux usées. Sandbank et al. (1974) ont présenté un rapport sur l'application de cette technique pour le traitement des eaux d'égouts brutes, lequel se faisait par le mélange des eaux d'égout brutes avec l'eau de mer et par le passage de ce mélange dans une cellule électrolytique. L'hydroxyde de magnésium contenu dans l'eau de mer était utile pour la floculation. Un rapport présenté par Barrett (1975) portait sur une autre application de la technique de l'électroflottation dans les cas

où le coût élevé de l'énergie et du remplacement des électrodes le justifiait. Chambers et Cottrell (1976) ont présenté un rapport sur l'utilisation d'électrodes améliorées pour le traitement par électroflottation de courants relativement faibles (20 m^3/h) de certains déchets industriels.

La technique de microflottation a été mise au point en Suède pour le traitement des eaux usées domestiques et industrielles (Hemming et al. 1976). Dans cette technique, l'air est dissous par l'application d'une pression hydrostatique à la base d'un bassin profond (habituellement 10 m de profondeur); la flottation se fait dans un réservoir de trop-pleins situé au niveau supérieur du bassin.

Dans toutes les techniques susmentionnées, on utilise l'air pour induire la flottation. La flottation sous vide, dans laquelle l'air est évacué lorsque l'effluent est soumis à une pression inférieure à la pression atmosphérique, est une autre technique de base. Elle n'a pas, cependant, été très utilisée dans le traitement des eaux usées et de l'eau (Chasse, 1958; Dick, 1972; Eliassen et Schulhoff, 1944) à cause de la quantité d'air limité disponible pour la flottation et de difficultés pratiques. La méthode de flottation sous pression est la plus utilisée et peut être subdivisée en système de pressurisation totale, partielle ou de recirculation. La méthode de recirculation est la plus utilisée pour épaissir les boues. Komline (1976) passe en revue cette technique telle qu'elle est pratiquée aux États-Unis.

3.2 Bref historique

La technique de flottation a été utilisée originalement dans les industries minières et métallurgiques et le premier brevet de flottation des minerais a été déposé par William Haynes en 1860 (Hansen and Gotaas, 1943). Elmore a été le premier à utiliser la technique de flottation sous vide au début des années 1900, mais c'est à Clemens que l'on doit la première unité qui a fonctionné avec succès. L'appareil de flottation sous pression de Juell a été le premier en son genre (Vrablik, 1959).

C'est l'industrie du papier qui a utilisé pour la première fois la technique de flottation pour le traitement des eaux. En Scandinavie, durant les années 1920, la technique "Sevealls" utilisant la flottation sous vide a été mise au point pour récupérer les fibres des déchets des scieries. La première application de la technique de flottation aux fins de traitement des eaux d'égouts a été réalisée en Californie en 1942 et, d'après un rapport, le traitement primaire des eaux d'égouts par flottation sous vide a fait son apparition dans une usine de l'Oklahoma en 1951. Pour obtenir un historique des applications des techniques de flottation, se reporter à Chase (1958).

La première installation de flottation sous pression utilisée pour la clarification et l'épaississement de la liqueur mixte dans une usine d'épuration par boues activées des eaux usées domestiques est celle de l'usine 3 800 m^3/j du Comté de Prince William en Virginie (Mulbarger et Huffman, 1970).

3.3 Théorie

Les théories fondamentales sur la flottation et les discussions sur les techniques ordinaires sont présentées dans des textes de base sur l'exploitation d'unités pour le génie sanitaire écrits par Rich (1961) et par Dick (1972), de même que dans de nombreux articles résumés, par exemple Vrablik (1959) et Turner (1975), et aussi dans la section appropriée du manuel de l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis, sur le traitement des boues (1974).

Le rapport de Vrablik (1959) contient la majeure partie de la théorie propre à la flottation sous pression. Les principes fondamentaux sont exposés de même que la notion selon laquelle le comportement de la flottation est basé sur les propriétés de la surface des boues. La théorie mathématique présentée est essentiellement celle de la décantation classique en sens inverse et comprend le chiffre de Reynolds et utilise la loi de Stokes. Ettlet (1964) étudie cette théorie plus en détail et utilise un nombre de rapports air/matières solides illimités (A/MS) dans de nombreuses équations et de nombreux graphiques portant sur la flottation des particules discrètes. Le problème est qu'aucune de ces théories fondamentales ne s'applique aux suspensions des déchets des eaux d'égouts par floculation.

Howe (1958) rapporte diverses théories expliquant la nature de la technique de flottation: les théories de l'électricité, de l'angle de contact, du gaz et de l'absorption. Sa méthode d'approche mathématique suit des lignes semblables à celles des chercheurs nommés antérieurement, mais comprend des paramètres comme les densités des liquides et des matières solides et la viscosité. On obtient une équation exponentielle qui établit un rapport entre la portion de matières solides enlevées et les variables indépendantes. Mulbarger et Huffman (1970) ont intensifié les recherches dans ce sens et ont introduit le rapport A/MS dans l'équation exponentielle. Ils ont ensuite appliqué avec succès l'équation aux résultats obtenus aux cours des essais à l'échelle.

Outre les théories mathématiques et connexes portant sur l'extrapolation et les calculs, nombre de chercheurs ont envisagé des explications sur le comportement du système. Vrablik (1959) présente trois mécanismes possibles par lesquels la flottation peut se produire après la formation des bulles:

1) L'adhésion d'une bulle gazeuse à une phase de liqueur ou de matières solides.
2) L'emprisonnement de bulles gazeuses dans une structure floculante au fur et à mesure que les bulles gazeuses montent.
3) L'absorption d'une bulle de gaz par une structure floculante au fur et à mesure que le floc se forme.

Baum et Hurst (1953) ont comparé la formation et l'adhésion des bulles dans les systèmes de flottation par air dissous et sous pression. Avec l'air dispersé, il y a un mélange de bulles et de matières solides dans la phase liquide et il est nécessaire de joindre les bulles aux matières solides. Dans la flottation sous pression, les bulles d'air utilisent les particules solides comme noyau pour la formation des bulles; ainsi, l'étape de la floculation ou du rassemblement du processus est éliminée, et il ne faut que de petites quantités de produits chimiques pour obtenir un comportement adéquat.

La taille des bulles d'air a aussi un effet important sur la flottation. Vrablik (1957) a expliqué que les bulles d'air devaient être les plus petites possibles, car plus elles sont petites, plus l'angle de contact sera important et plus grande sera la surface unitaire couverte par la surface unitaire de la bulle. L'importance du contact entre les deux peut, en retour, être augmentée. Kormanik (1974) a soutenu la controverse selon laquelle la taille optimale des bulles est obtenue sous une pression de 208 kPa, mais Bratby et Marais (1975) ont indiqué que d'un point de vue économique, la pression optimale de saturation devrait être de 350 kPa. En deçà de cette pression, il est difficile d'atteindre un niveau élevé de saturation.

Il est commun d'utiliser des produits chimiques pour améliorer le comportement de la flottation. En fait, les usines à l'échelle utilisent un ou plusieurs agents de flottation. Depuis 1943, Hansen et Gotaas ont fait des expériences avec des composés organiques hétéropolaires dans le but de changer la tension superficielle et l'angle de contact. Vrablik (1959) s'est reporté à sept types de produits chimiques utilisés comme agents de flottation: floculateurs, moussants, promoteurs (catalyseurs), dépresseurs, activeurs, agents sulfurants et régulateurs de ph. Dans le domaine du traitement des eaux usées, on utilise presque exclusivement les floculateurs qui sont habituellement de polymères et (ou) des produits chimiques comme l'alun ou le chlorure ferrique (McMichael, 1974; Komline, 1976; Levy et al., 1972).

La plupart des unités de flottation sous pression à l'échelle qui sont exploitées en Amérique du Nord utilisent un liquide recirculé mis sous pression pour l'alimentation en air pour les raisons suivantes:

a) les liqueurs non traitées obstruent facilement l'équipement de pressurisation;
b) la mise sous pression de la boue a tendance à entraîner un désagrègement du floc; et
c) selon le rapport de recirculation, on peut appliquer des quantités extrêmement variées d'air pour la flottation.

Pour obtenir plus de détails sur ce facteur, voir Dick (1972), Eckenfelder et al. (1958), Komline (1976), Vrablik (1959) et Wood et Dick (1973).

3.4 Études en laboratoire

Dans leur rapport de 1953, Kalinske et Evans ont fait remarquer qu'un des facteurs importants du processus de flottation sous pression est le relâchement soudain des eaux usées sous pression ou recyclées, grâce à un détendeur de pression. Si le liquide est mis sous pression et que la pression est relâchée graduellement, les bulles d'air ne sortiront pas de la solution et le liquide demeurera sursaturé. En pratique, la baisse rapide de pression se produit lorsque le liquide mis sous pression passe d'un réservoir sous pression à un autre réservoir sous pression atmosphérique; la turbulence qui se produit entraîne la formation et le relâchement de bulles.

Eckenfelder et al. (1958) sont les premiers à avoir étudié en laboratoire la flottation sous pression. Ils ont effectué le test à deux cylindres ou "bomb" maintenant populaire, lequel test est présenté en détails dans l'article paru en 1958 et dans un article de Eckenfelder et Ford (1970). L'importance du rapport A/MS a été mise en valeur et d'autres paramètres comme le type de boue et l'indice de volume des boues (IVB) ont été évalués afin de connaître leur effets sur le floc et la concentration de matières solides dans l'effluent. La présentation affiche un défaut important en ce sens qu'on n'a pas tenu compte de la concentration variable des matières solides présentes dans l'affluent; on a présupposé que ce paramètre et d'autres comme l'IVB et la température étaient constants dans une grande variété de tests. De même, on a supposé que le pourcentage de saturation était de 100 pour cent ou on ne l'a pas mentionné. Cependant, il est à remarquer que ces défauts se retrouvaient dans la plupart des études sur la flottation qui ont fait l'objet de la revue.

L'article de Eckenfelder et Ford (1970) est grandement utilisé à titre de "manuel" pour effectuer les études en laboratoire sur la flottation sous pression. Les principaux composants utilisés dans la technique de flottation sous pression sont la pompe foulante, un cylindre servant de réservoir de rétention, un raccord, un détendeur et le

cylindre servant de réservoir de flottation. Les auteurs ont exposé de façon simple les marches à suivre en laboratoire, mais l'article plus récent de Turner (1975) fournit plus de détails sur la méthode d'approche particulière en laboratoire.

Stander et van Vuuren (1970) donnent une liste de certains des critères importants qui doivent être évalués en laboratoire:

1) un floculant plus approprié et des exigences de dosage et de mélange optimaux;
2) la période nécessaire à la formation et au conditionnement du floc;
3) les exigences d'aération;
4) la vitesse de séparation des matières solides aérées en suspension (vitesse d'élévation);
5) la nécessité, et au besoin, le dosage d'un activeur approprié pour améliorer l'adhésion des bulles de gaz.

Wood et Dick (1973) ont ajouté à cette liste:

6) Le matériau flottera-t-il vraiment?
7) Jusqu'à quel point le matériau flottera-t-il bien?
8) Quel degré de clarification de l'effluent obtiendra-t-on?

Dans leur article datant de 1973, Wood et Dick ont fait un rapport sur l'avancement important au sein de la technique en laboratoire. Un appareil à trois cylindres a été utilisé et jugé supérieur; de plus, il était plus représentatif des unités à l'échelle que l'appareil dit "bomb". Il a été jugé qu'un mélange continu des eaux usées (affluent) et des courants recirculés mis sous pression offrait les conditions les plus proches de celles que l'on retrouve dans les unités en fonctionnement continu. On a obtenu des vitesses d'élévation supérieures et une flottation plus complète (c'est-à-dire des quantités de matières solides plus petites dans les eaux clarifiées) des matières solides lors de l'utilisation de l'appareil à trois cylindres plutôt qu'à deux cylindres.

Mennell et al. (1974) ont effectué des expériences sur la clarification de l'effluent primaire en ajoutant de la chaux et en appliquant ensuite la technique de flottation sous pression. Ils ont utilisé une unité de laboratoire de fonctionnement continu nécessitant un débit de 1 L/min fourni selon un mode d'opération à contre-courant. Un dispositif d'injection d'air était installé au bas de la colonne de flottation afin de faciliter la production de bulles et d'améliorer l'adhésion; on a aussi utilisé un équipement de pompage et de mesure de haute précision.

Wood et Dick (1974) ont élaboré leur article précédant en considérant les effets des caractéristiques de la boue sur le comportement de la flottation. Les deux paramètres qui ont été utilisés pour décrire la boue étaient l'importance du rendement et la viscosité plastique mesurés à l'aide d'un viscosimètre rotatif à cylindres coaxiaux. Bien que ces paramètres aient donné des mesures quantitatives des caractéristiques de la boue, on pouvait aussi les relier de façon quantitative au type d'organismes filamenteux présents. Ils se sont aperçus que plus l'importance du rendement et la viscosité plastique augmentaient (impliquant une augmentation du nombre d'organismes filamenteux), plus la concentration du floc diminuait. Ils ont recommandé la séparation par flottation des eaux usées qui se décantent difficilement (à cause de la présence des organismes filamenteux) et l'utilisation d'organismes filamenteux, qui sont souvent plus efficaces au niveau du substrat, dans le processus de traitement plutôt que de les détruire à l'aide de produits chimiques ou autrement (voir aussi Wood, 1970).

Speece et al. (1975) ont mis au point un système de transfert de gaz utilisant peu d'énergie et décrit en détail dans leur rapport. L'appareil de Wood et Dick décrit ci-dessus a été utilisé pour les expériences en laboratoire. Les auteurs ont indiqué que le volume de gaz qui s'échappait après la dépressurisation a été mesuré dans un système fermé, mais n'ont pas donné de détails concernant la marche à suivre. Ils ont supposé qu'une saturation de 75 pour cent avait été obtenue.

Le Water Research Centre en Angleterre a effectué beaucoup de recherches sur l'utilisation de la technique de flottation sous pression pour le traitement d'une grande variété d'eaux de surface. Leur programme sur la flottation a nécessité la mise au point d'un appareil d'essai de floculation afin d'étudier une variété de variables. L'équipement et la marche à suivre expérimentale sont décrits dans un résumé fait par Hyde et al. (1977). Trois réservoirs de flottation de capacité de 1,2 L ont été dotés de palettes mécaniques à vitesse variable. Un collecteur relié à la partie inférieure des pots fournissait, par l'intermédiaire de soupapes à solénoïde contrôlées par des minuteries, un débit d'eau saturé d'air à une pression atteignant 690 kPa. Les dispositifs de commande permettaient d'envoyer les mêmes décharges d'air dissous ou différentes décharges d'air dissous à chaque réservoir.

Le niveau de saturation d'air dans le système de flottation sous pression est important pour le comportement. Eckenfelder et al. (1958), entre autres, ont fait des commentaires sur la variation de ce facteur dans diverses conditions physiques. Leininger et Wall (1974), Bratby et Marais (1975) et Gehr et Henry (1976) ont présenté des méthodes

pour mesurer le pourcentage de saturation, mais les chercheurs ont assumé que ce pourcentage se situait quelque part entre 75 et 100 pour cent (Dick, 1972; Eckenfelder et Ford, 1970: Vrablik, 1957).

3.5 Études aux usines pilotes

Le matériel de cette section et de la section suivante est divisé en quatre catégories: les eaux d'égouts domestiques, les boues activées domestiques, les eaux usées industrielles et les eaux brutes.

3.5.1 Les eaux d'égouts. L'une des premières expériences faites avec une usine pilote d'épuration par flottation sous pression dans le domaine du traitement des eaux d'égouts a été rapportée par Hay en 1956. Les études ont été menées à l'usine d'épuration des eaux d'égouts Racine du Wisconsin aux États-Unis. L'expansion de l'usine a nécessité soit la construction de nouvelles installations de traitement primaire ou la conversion d'un des décanteurs en bassin de flottation. Les tests pilotes ont démontré que l'on pouvait enlever plus de 50 pour cent des matières solides en suspension grâce à la technique de flottation sous pression et que l'augmentation des coûts d'exploitation serait plus que compensée dans ce cas par les économies au niveau des coûts de construction.

Le traitement des eaux usées brutes et des trop-pleins d'égouts combinés à l'aide de la flottation sous pression a fait l'objet de rapports par Levy et al. (1972) et par White et Cole (1973). Les travaux ont été effectués à l'installation d'épuration par flottation sous pression située à l'exutoire de Baker Street en Californie, États-Unis, une usine pilote automatisée d'une capacité de 24×10^6 gals U.S./j (1,05 m^3/s) conçue pour fonctionner lorsqu'il y a un trop-plein occasionné par les débits de pointe durant les tempêtes. On a procédé, conjointement avec le traitement préalable à l'alun de 0,8 à 3,2 mg/g de matières solides dans l'affluent (MST) et en utilisant un rapport air/matières solides variant entre 0,05 et 0,10, à l'enlèvement de plus de 90 pour cent des matières solides dans l'affluent. L'addition d'un polymère s'est avéré inutile.

Huether (1974) a écrit un rapport sur le traitement primaire des eaux usées effectué à l'aide de la technique de flottation sous pression. Les tests au Wastewater Technology Centre de Burlington en Ontario ont été effectués avec des eaux usées provenant de l'usine d'épuration des eaux usées Skyway de Burlington. On a utilisé une unité de flottation sous pression Komline-Sanderson d'une capacité de 15 pi^2 (1,39 m^2) pour étudier les effets du A/MS et de l'addition de produits chimiques et de polymères. On a réussi à enlever une quantité optimale de matières solides avec une dose d'alun de

100 mg/L combinée à une dose de polymère (Dow A-32; anionique) de 1,0 mg/L. Le rapport air/matières solides a été estimé ente 0,35 et 0,45. On a réussi à obtenir des réductions de matières solides supérieures à 90 pour cent dans des quantités de matières solides en suspension dans l'affluent (MSS) variant entre 220 et 540 mg/L, avec une concentration du floc variant entre 2,5 et 3,5 pour cent.

3.5.2 Boues activées provenant de sources domestiques. Dans un document général sur la théorie et la pratique de la flottation, Ettelt (1964) a décrit des expériences en laboratoire et dans une usine pilote portant sur l'épaississement des boues activées décantées à l'usine Southwest de Chicago. Il était nécessaire d'avoir une concentration de boue d'environ cinq pour cent pour que le processus Zimpro puisse se prolonger de lui-même et, pour cette raison, on a utilisé la technique de flottation plutôt que celle de l'épaississement par gravité. L'unité expérimentale était composée d'un décanteur transformé de 300 m^2 sur 4,4 m de profondeur. Les paramètres optimisés comprenaient la forme du dispositif d'admission d'eau, le type de liquide recirculé, le rapport air/matières solides, la charge massique des matières solides et l'addition de produits chimiques. On y trouve une discussion importante sur les problèmes d'exploitation.

Brown (1972) a décrit deux séries d'expériences sur la flottation effectuées dans une usine pilote à l'usine d'épuration Crossness en Angleterre. On a essayé une usine "Simcar Electraflote", fonctionnant au gaz produit par électrolyse, mais elle est devenue inappropriée à cause de l'accumulation rapide de matériaux sur la cathode au carbone. La deuxième série de tests a été effectuée avec une unité de flottation sous pression Komline-Sanderson d'une capacité de 15 pi^2 (1,39 m^2). Cette technique a été jugée prometteuse pour le Greater London Council, bien qu'on n'ait pas établi les conditions optimales dans les tests qui ont fait l'objet du rapport. Le but premier des expériences était d'essayer d'obtenir une boue plus épaisse en laissant le floc s'égoutter sur un treillis métallique. Il a été possible d'augmenter la concentration de matières solides dans les boues de quatre à six pour cent.

Les effets des diverses variables de contrôle sur le comportement de la flottation ont fait l'objet de rapports par Campbell et Le Clair (1974) et Campbell, Tew et Le Clair (1975). Les rendements d'un dispositif de laboratoire fonctionnant en discontinu, d'une unité pilote Komline-Sanderson d'une capacité de 1 pi^2 (0,093 m^2) et d'une unité pilote Komline-Sanderson d'une capacité de 15 pi^2 (1,39 m^2) ont été comparés. Ont aussi été examinés les résultats du fonctionnement d'une unité de flottation sous pression à l'échelle d'une capacité de 400 pi^2 (37 m^2) à l'usine d'épuration des eaux usées de la ville

d'Hamilton. On en est venu à la conclusion, à partir d'une série limitée de tests et d'hypothèses sur le rapport air/matières solides, que les unités fonctionnant en discontinu, de laboratoire et à l'échelle pilote pouvaient servir à concevoir des unités à l'échelle avec assez de précision. Le deuxième article comprend aussi une analyse des coûts afférents à la flottation sous pression de même que des graphiques explicatifs établissant un rapport entre les matières solides présentes dans le floc et le rapport air /matières solides et la dose du polymère.

Davis a écrit un article (1977) sur l'utilisation de la technique de flottation sous pression à l'usine d'épuration Olifantsvlei à Johannesburg en Afrique du Sud. Une unité Komline-Sanderson a été utilisée pour épaissir la liqueur mixte et les boues activées de retour. L'usine Olifantsvlei offrait un temps de séjour des matières solides de 25 jours, permettant une excellente bio-floculation et rendant ainsi les boues particulièrement aptes à être traitées par flottation sans l'utilisation de produits chimiques ou de polymères. Cette étude sera reprise plus en détails dans la section 3.9.

Pour obtenir un résumé des données d'exploitation des 19 usines pilotes des États-Unis qui traitent la liqueur mixte ou les boues de retour, voir l'Environmental Protection Agency (1974).

3.5.3 Eaux usées industrielles. L'utilisation de la technique de flottation sous pression dans le traitement des eaux usées industrielles est plus répandue que dans le domaine des eaux usées domestiques, et il existe beaucoup de documentation à ce sujet. La revue suivante porte seulement sur les articles qui, selon les auteurs, sont pertinents pour la présente étude.

L'utilisation de la technique de flottation sous pression aux fins de clarification de la liqueur mixte provenant d'une usine d'épuration de l'Ontario traitant les eaux usées de la fabrication du nylon et ayant une tendance au foisonnement a fait l'objet d'une discussion par Climenhage et Stelzig (1973). L'usine pilote pour le traitement biologique des déchets chimiques appliquait le processus d'épuration en deux étapes par boues activées pour la nitrification et la dénitrification. On s'attendait à ce que la production de nitrogène cause des problèmes de flottation dans le clarificateur; de plus, le foisonnement de filaments (avec un IVB supérieur à 400) a causé d'autres problèmes de fonctionnement au niveau du clarificateur et a bouleversé tout le processus. Les résultats ont démontré qu'il serait faisable d'utiliser la technique de flottation sous pression et qu'il était possible d'obtenir sans polymère une concentration de matières solides dans

l'effluent variant entre 40 et 80 mg/L. Après avoir ajouté 5 mg/L de Rohm et d'Haas C-3, la concentration des matières solides en suspension dans l'effluent a été réduite à des quantités variant entre 10 et 30 mg/L.

La flottation par électrolyse et sous pression de la liqueur mixte provenant d'une usine de pâtes et papier intégrée à Filer City au Michigan, États-Unis, a fait l'objet d'une étude (Walzer, 1975). L'utilisation de la flottation par électrolyse s'est avérée un échec; par contre, l'unité de flottation sous pression s'est avérée économique aux fins de clarification de la liqueur mixte. On a estimé à 51 pour cent, l'économie des coûts en capital pour une unité de flottation sous pression par rapport à un bac de clarification par gravité, et le fait qu'aucun produit chimique n'ait été ajouté montrait que les coûts d'exploitation seraient comparables. L'unité de flottation utilisée dans l'étude est assez intéressante. La Permutit Favair Mark II diffère des unités de flottation sous pression ordinaires en ce sens qu'elle est munie de chicanes ou "lamelles" longitudinales dans le compartiment de flottation, ce qui réduit le nombre de Reynold et, selon les oui-dire, permet à l'usine de fonctionner avec des charges de deux à trois fois plus élevées que dans le cas d'unités de flottation ordinaires. De plus, les usines pilotes peuvent utiliser le même bassin de base avec moins de lamelles, éliminant ainsi les problèmes de tartre. Les auteurs n'ont fait aucun commentaire sur les problèmes pouvant se poser à cause des modifications compliquées apportées à l'arrivée d'eau, de même qu'à cause du nettoyage et de l'entretien de sections étroites de bassin.

Valiquette (1976) a rédigé un article sur une autre application industrielle des lamelles dans un bassin de flottation aux fins d'amélioration du comportement. La technique de flottation sous pression a été mise à l'essai à titre de méthode de traitement primaire de l'effluent de l'atelier de préparation du bois de l'usine de pâtes et papiers Kruger à Bromptonville au Québec. On s'est aperçu que lors de l'utilisation des lamelles, on pouvait augmenter la vitesse du débit d'environ 30 pour cent, tout en enlevant la même quantité de matières solides en suspension. Parsons (1977) a rédigé un rapport sur une unité de flottation sous pression Permutit Favair Mark II, utilisée pour la clarification d'un mélange de liqueur mixte avec boues activées et d'un effluent terminal provenant d'un clarificateur. Le but était de déterminer si l'unité pouvait réussir à éliminer les dernières traces d'impuretés dans l'effluent et si elle pouvait répondre à des charges élevées de matières solides advenant une panne temporaire dans le clarificateur. L'unité d'épuration par boues activées traitait les eaux d'égouts provenant d'une usine d'aliments préparés. On s'est aperçu que la technique de flottation sous pression réduisait de façon

très efficace le surplus de matières solides en suspension dans l'effluent provenant du décanteur lorsqu'un polymère était ajouté.

Dans un autre article récent, Albert (1977) fait la description d'une étude comparative de l'épaississement des boues de déchet activées industrielles et municipales, effectué à l'aide d'épaississeurs de flottation à écoulement en bloc et à contre-courant. Le dernier, mis au point par la compagnie Ingersoll-Rand, fonctionne sur le principe que l'écoulement à contre-courant donne plus de chance aux bulles et aux matières solides d'entrer en contact. L'auteur a soutenu dans l'article que cette méthode de flottation à écoulement à contre-courant permettait d'épaissir de deux à quatre fois plus de matières solides par zone de flottation efficace que les épaississeurs ordinaires à écoulement en bloc, tout en offrant une qualité du floc et de l'effluent semblable. De plus, le rapport air/matières solides était d'environ 50 pour cent inférieur. Cependant, les conclusions s'appuyaient sur un ensemble de données (présentées) extrêmement limité.

3.5.4 Eaux brutes. Déjà, en 1942, Hopper et McCowen donnaient une description d'un processus de flottation utilisé pour purifier les eaux brutes. Bien que les tests aient été effectués en laboratoire, le concept et les résultats ont une importance pour l'application à l'échelle. Les auteurs ont utilisé l'aération et un surfactif pour réaliser la flottation et, ensuite, ils ont analysé l'eau clarifiée du point de vue de la turbidité, de la toxicité et des résidus de produits chimiques. Ils ont aussi déterminé la quantité de bactéries, de parasites et de virus qui avaient été éliminés. Ils en sont venus à la conclusion que la flottation était une technique de traitement de l'eau efficace, mais qu'il était nécessaire d'ajouter du chlore à l'eau après avoir effectué la flottation, afin de rendre l'eau apte à la consommation.

Zabel et al. (1976) ont rédigé un rapport sur le programme expérimental au Water Research Centre en Angleterre. Cet organisme possède cinq usines pilotes traitant chacune 2 300 m^3/j d'eau brute soumise chimiquement à la floculation, avant la filtration par le sable. Les eaux soumises à l'étude comprenaient les eaux entreposées, eutrophes et les eaux de rivières turbides. À cause de la courte période durant laquelle le programme expérimental a fonctionné, seules des conclusions limitées ont pu être tirées, et il semble que la technique par flottation soit une solution pratique pour remplacer la décantation dans le cas des eaux qui, jusqu'ici, ont fait l'objet d'une étude.

Hyde (1977) a fait une revue, à partir d'une bibliographie considérable, de l'expansion de la flottation comme méthode de clarification de l'eau en Europe et en

Angleterre. En 1973, il y avait 71 usines de flottation sous pression exploitées pour la clarification de l'eau en Scandinavie. Sa revue couvrait aussi les études effectuées sur les usines pilotes qui ont précédé l'établissement des cinq plus grandes unités de flottation sous pression décrites par Zable et al (1976).

Snider (1975) résume les résultats des tests effectués dans quatre prototypes d'usines de flottation sous pression traitant les étangs aérés et éliminant les dernières traces d'impuretés des effluents des étangs. Les usines traitaient les eaux usées d'équarissage, les eaux usées des usines de mise en conserve de légumes, des postes de volaille et des municipalités. Dans tous les cas, la DBO de l'effluent et la concentration des matières solides en suspension étaient inférieures à 6 mg/L, mais il a fallu effectuer un traitement avec de l'alun et un polymère.

3.6 Installations à l'échelle

3.6.1 Eaux d'égouts. Une unité à l'échelle de flottation sous vide à l'usine McAlister à Oklahoma aux États-Unis a fait l'objet d'un article rédigé par Collins et Burns (1951). La DBO des eaux d'égouts filtrées a été réduite de 28 pour cent avec une vitesse moyenne de déversement de 194 $m^3/m^2 \cdot j$.

Dans leur article rédigé en 1973, Gupta et Agnew ont effectué une revue de l'exploitation de deux usines de flottation sous pression à l'échelle traitant les trop-pleins d'égouts combinés. La première se trouvait à Milwaukee, Wisconsin, États-Unis, et traitait un débit de 18 900 m^3/j. Les charges variaient souvent, car l'usine devait traiter les premiers flots de même que les écoulements des tempêtes subséquentes. Néanmoins, les concentrations de matières solides en suspension et de la DBO ont été réduites d'environ 30 pour cent avec des charges hydrauliques de 2,24 $L/m^2 \cdot s$; il a cependant fallu ajouter un produit chimique ($FeCl_3$, 20 mg/L) et un polymère (Dow C-32, 4 mg/L).

Le deuxième projet s'appuyait sur la conception du premier. Deux usines de la ville de Racine au Wisconsin, États-Unis, traitant respectivement 53 400 et 168 000 m^3/j d'eau ont fait l'objet d'une étude. Les deux usines se mettaient automatiquement en marche lorsque le niveau de l'émissaire atteignait un niveau prédéterminé. Les systèmes étaient encore à l'étude lorsque cet article a été publié et aucun résultat n'a été présenté.

White et Cole (1973) ont rédigé un rapport sur une unité de flottation sous pression d'une capacité de 91 000 m^3/j, semblable à celle décrite ci-dessus et qui traitait des trop-pleins d'égouts unitaires. Cette usine est celle de Baker Street à San Francisco. Ils ont trouvé que le taux de charge du liquide et le type et le dosage de l'agent chimique

étaient les deux variables qui avaient le plus d'effet sur le comportement de la flottation sous pression lorsqu'aucune limite n'était imposée au rapport air/matières solides. Ils se sont aperçus que l'addition d'une quantité de 6 mg/L d'alun était appropriée et que le seuil du rapport air /matières solides était de 0,22, au-delà duquel aucune amélioration ne s'est produite dans le comportement. Aucun taux de charge hydraulique approprié pour l'unité à l'échelle n'a été donné.

3.6.2 Boues activées provenant de sources domestiques. Comme il a été mentionné auparavant, l'article d'Ettelt (1964) traitait des unités de flottation qui ont précédé la technique Zimpro. Le rendement des unités de flottation sous pression à l'échelle a été amélioré en installant des plaques à orifice dans la ligne d'alimentation partant du saturateur, afin de contenir l'effet d'expansion à l'intérieur de la conduite d'admission. Il a été possible d'améliorer la récupération des matières solides en ajoutant un polymère (dans ce cas, Dow Purifloc 601). Deux ans plus tard, Ettelt et Kennedy (1966) ont fait un autre rapport sur l'expérience effectuée avec la technique de flottation sous pression à l'usine de Chicago. En mélangeant 15 pour cent des eaux d'égouts brutes avec 85 pour cent de boues activées, la concentration des matières solides dans le floc augmentait. Cependant, il a fallu faire passer de 250 pour cent à 300 pour cent le rapport de recirculation, afin d'obtenir un rendement adéquat.

Dans un article, Katz et Geinopolis ont établi une liste des détails portant sur les installations de flottation sous pression existantes aux États-Unis. Huit usines fonctionnant sans produit chimique ont été étudiées, la majorité d'entre elles traitant les eaux usées domestiques. Quatre de ces usines traitaient des boues primaires et secondaires combinées. Les données sur le fonctionnement et le rendement des deux usines utilisant des polyélectrolytes cationiques ont été évaluées, et, comme les deux usines présentaient des données sur le fonctionnement qui se faisait sans l'addition de polymères, il a été possible de faire une comparaison. Ils ont découvert que la concentration du floc n'augmentait pas à la suite de l'addition d'un polymère, et que les usines pouvaient recevoir une charge de matières solides plus élevée, ce qui améliorait la captation des matières solides et donnait un effluent plus clair.

Mulbarger et Huffman (1970) ont décrit ce qu'ils prétendent être la première application à l'échelle de la technique de flottation sous pression pour la clarification de la liqueur mixte. Leur étude de l'usine du comté de Prince William aux États-Unis, d'une capacité de 3 800 m^3/j, a nécessité la réalisation d'expériences sur un grand nombre de

débits et de concentrations de matières solides: 2 270 - 4 540 m^3/j et 960 - 8 000 mg/L respectivement. La boue, provenant de bassins aérés mécaniquement avait continuellement des indices de volume des boues faibles, de l'ordre de 58 mg/L. La concentration de matières solides dans l'effluent augmentait de façon marquée, passant d'environ 100 mg/L jusqu'à 600 mg/L, lorsque les charges excédaient 73 kg/m^2•j. D'un autre côté, il semble que les matières flottantes étaient plus influencées par le temps de séjour du floc que par le taux de charge des matières solides. En effectuant une comparaison du coût et de la qualité de la flottation avec la décantation, on s'est aperçu que la flottation donnait un effluent médiocre, entraînait des coûts plus élevés en énergie et en capital et était plus difficile à exploiter. Le seul avantage qu'elle offrait était que la boue produite était plus épaisse.

Dans un article (1975), Burfitt décrit le rendement d'une unité de flottation sous pression à l'échelle de l'usine d'épuration Aycliffe, d'une capacité de 24 000 m^3/j, en Angleterre. En utilisant 9,5 mg/g du polymère Zetag 94, on a pu épaissir 850 m^3/j de boues activées de surplus contenant 5 000 mg/L de matières solides en suspension, avec un pourcentage de matières solides total de 4,5 pour cent et un effluent contenant 18 mg/L de matières solides en suspension.

La charge de matières solides était de 7,8 kg/m^2•h. Dans un article plus récent, Ashman (1976) a présenté d'autres données sur le fonctionnement de l'usine de flottation sous pression Aycliffe.

Dans une revue générale, Komline (1976) donne un exemple pour démontrer comment l'utilisation de la flottation sous pression au lieu de l'épaississement par gravité avant la filtration sous vide permet d'économiser au niveau des produits chimiques et de la main-d'oeuvre de même qu'en capital, dans un système d'épaississement/filtration combiné. L'auteur note que Komline-Sanderson a construit plus de 350 unités de flottation, la majorité desquelles épaississent les boues activées décantées. L'article comprend un résumé des données d'exploitation provenant de 20 installations pilotes à l'échelle aux États-Unis, la plupart d'entre elles traitant les eaux d'égouts des municipalités. L'article comprend aussi une analyse détaillée des coûts afférents à l'épaississement par flottation pour les usines de capacité de 37 850 et 378 500 m^3/j.

Hemming et Cottrell (1976) ont rédigé un rapport sur des expériences qui ont été tentées en Suède et en Finlande dans le domaine du traitement à l'échelle des eaux d'égouts domestiques avec la technique de la microflottation. Le traitement global était soit physique/chimique, auquel cas la technique de flottation était utilisée après le

procédé de coagulation chimique, soit biologique/physique/chimique, auquel cas la flottation était utilisée pour clarifier la liqueur mixte.

3.6.3 Eaux usées industrielles. L'une des premières applications de la technique de flottation dans le domaine du traitement des eaux usées a été pour le traitement des eaux d'égouts contenant une quantité élevée d'huile et de matières grasses. Dans la présentation qu'il a faite en 1957 à la Conférence sur les déchets industriels de Purdue, Vrablik a donné des détails sur un système qui utilisait la décantation par gravité, suivie de la flottation sous pression, pour traiter les eaux d'égouts provenant de la raffinerie de pétrole Watson de San Francisco. Comme les particulaires ne représentaient pas un problème, toutes les eaux étaient mises sous pression. Avec une vitesse de déversement d'environ 4,9 m/h, la concentration d'huile minérale dans l'affluent est passée de 100-125 mg/L à 30-45 mg/L, sans l'aide de produits chimiques.

Birdle et al. (1976) ont rédigé un rapport sur les données d'exploitation à l'échelle concernant le traitement des eaux usées à haute concentration d'une usine de produits chimiques (étudiées à l'échelle pilote par Climenhage et Stelzig (1973) comme il a été mentionné à la section 3.5.3). Une unité de flottation sous pression a été utilisée pour séparer les matières solides biologiques au lieu d'un bassin de décantation par gravité. Certains problèmes se sont posés au niveau du fonctionnement de l'unité de flottation, en particulier lorsque les rapports matières organiques/micro-organismes étaient élevés, mais, après diverses modifications, le rendement a été jugé adéquat en termes de clarification. La concentration du floc variait d'un à trois pour cent et celui des matières solides en suspension dans l'effluent, de 100 à 400 mg/L. Il n'est fait aucune mention sur l'addition de produits chimiques.

Depuis le mois de novembre 1974, un séparateur par flottation à contre-courant Ingersoll Rand est utilisé comme clarificateur primaire dans un moulin à papier du New Hampshire, États-Unis (Knapton et Taylor, 1975). Le bassin de flottation d'une superficie de 3,1 m^2 et d'une hauteur de 5,8 m a été conçu pour fonctionner sous des charges hydrauliques de 8,5 m/h avec 0,75 à 1,5 mg/g du polymère. On s'attendait à obtenir un pourcentage de floc total de cinq à six pour cent et une concentration de matières solides en suspension dans l'effluent de 100 mg/L ou moins. Lors de l'exploitation, ces taux ont été confirmés et, au moment où cet article a été écrit, une deuxième unité avait été commandée, laquelle servirait de clarificateur secondaire après le traitement biologique par aération prolongée.

Dans l'article qu'ils ont écrit en 1976, Chambers et Cottrell donnent des exemples d'application à l'échelle de la technique d'électroflottation et de microflottation. La technique de l'électroflottation a été utilisée dans environ 20 usines du Royaume-Uni pour le traitement des déchets comme les liqueurs de lavage provenant des imprimeries, les eaux usées graisseuses et grasses provenant des usines de conditionnement de la nourriture, et les effluents provenant des camions de transport. Environ 19 usines de microflottation fonctionnent actuellement en Suède et d'autres sont en chantier en Finlande, en Norvège, au Royaume-Uni et au Japon. La technique a été utilisée, entre autres, sur les effluents de textile, les eaux usées des acieries et les effluents des moulins à papier.

3.6.4 Eaux brutes et élimination des traces d'impuretés dans l'effluent. Bien que beaucoup d'expériences dans des usines pilotes aient été faites au Royaume-Uni sur le traitement des eaux brutes par flottation sous pression, aucun rapport n'a été publié jusqu'à maintenant sur les installations à l'échelle. Les usines pilotes utilisées étaient relativement grandes (2 300 m^3/j; 8,64 m^2) et le fait que leur exploitation se soit avérée un succès indique que l'application à l'échelle serait satisfaisante.

À la suite des expériences avec des unités pilotes, un système de lagune/flottation sous pression a été mis en exploitation à l'échelle à la fin de l'année 1974 pour traiter les eaux usées d'un poste de volaille (Snider, 1975). Les résultats des tests ont indiqué que le rendement était semblable à celui des unités pilotes et qu'il était possible d'avoir des charges hydrauliques plus élevées avec l'équipement à l'échelle. Ceci était attribué au degré de contrôle plus élevé qu'il était possible d'avoir avec l'équipement à l'échelle. Les facteurs économiques afférents à ce système sont présentés brièvement.

3.7 Comparaison entre la décantation et la flottation

Il est probable que les renseignements généraux les plus importants qui ont été tirés des travaux en laboratoire à l'échelle pilote proviennent des comparaisons entre la décantation et la flottation aux fins de séparation des matières solides (Kalinske, 1958; Kalinske et Evans, 1953; Kats, 1964; Vrablik, 1959; Walzer, 1975), et un résumé est présenté ci-dessous.

L'avantage principal que présente la flottation sous pression par rapport à la décantation est que le taux le plus élevé d'assèchement, qui se produit avec la flottation sous pression, permet de réduire la période de séjour et, conséquemment, l'espace occupé par l'unité. En général, on obtient des boues plus épaisses par flottation. Ces boues sont

appropriées pour la digestion aérobie ou pour être retournées aux bassins d'aération, si les boues activées sont la deuxième étape du traitement. Ce procédé est habituellement plus stable que la décantation, car les boues qui foisonnent et les autres ayant des caractéristiques de décantation médiocres (en particulier de nature passagère) peuvent être traitées sans interruption. Katz (1963), lorsqu'il parle du fonctionnement de la flottation sous pression, fait remarquer que la flottation n'enlève pas les sables et les petites particules inertes de densité élevée, ce qui est un avantage si la digestion anaérobie doit suivre la flottation. Il semble aussi évident que, dans ce cas, la flottation peut être utilisée pour enlever les sables et faire partie de l'application de la flottation sous pression pour le traitement des eaux d'égouts brutes. À condition d'avoir un racloir de fond approprié et que les pompes puissent recevoir l'affluent sablonneux, le système de flottation sous pression peut être conçu comme une installation d'élimination primaire des matières solides/sables.

Les désavantages de la flottation, lorsqu'on la compare à la décantation, sont que l'effluent est de qualité médiocre, les coûts pour l'énergie et les produits chimiques sont élevés, une exploitation par des spécialistes est nécessaire et il est probable que l'équipement sera moins fiable. Kalinske et Evans (1953) stipulent que les conditions de traitement nécessitant des périodes de contact longues, comme la nécessité d'un contact prolongé avec les matières solides précipitées antérieurement, ne seront pas les meilleures avec la flottation sous pression.

On peut considérer la flottation sous pression comme une solution convenable et même préférable pour remplacer la décantation, dans le cas où la qualité de l'effluent n'est pas un facteur important, lorsque l'espace est limité, lorsqu'il est nécessaire d'avoir des boues très épaisses (disons six pour cent) pour certaines étapes subséquentes du traitement, et lorsque les matières en suspension à traiter ont des caractéristiques de décantation médiocres.

3.8 Coûts afférents à la flottation

Il existe très peu de renseignements sur les facteurs économiques portant sur la flottation comme solution de rechange pour la décantation. Le plus ancien rapport concernant la flottation sous pression des eaux d'égouts a été rédigé en 1956 par Thomas H. Ray, le surintendant de l'usine de traitement primaire des eaux d'égouts de Racine, Wisconsin. Une usine pilote de flottation sous pression fabriquée par la Chain Belt Company a été utilisée pour comparer l'extraction des matières solides par flottation avec

celle effectuée dans les bassins de décantation existants. L'unité de flottation sous pression a extrait de 55 à 65 pour cent des matières solides, par rapport à environ 50 pour cent lors de l'utilisation des bassins de décantation.

On a effectué une comparaison entre le coût associé à la conversion d'un des bassins de décantation existant en une unité de flottation et le coût afférent à la construction de deux bassins de décantation supplémentaires. La comparaison des coûts en capital a donné des résultats en faveur de la décantation (50 000$ c. 375 000$). Les coûts d'exploitation et d'entretien afférents à chacun des systèmes étaient approximativement les mêmes, mais seulement parce que les coûts associés à la dépréciation avaient été inclus dans les chiffres annuels. De toute évidence, la comparaison n'a pas reflété une situation normale, étant donné que la flottation profitait d'un avantage non typique dans la plupart des applications.

Mulbarger et Huffman (1970) ont effectué une étude sur la séparation des matières solides présentes dans la liqueur mixte, effectuée à l'aide d'une unité de flottation sous pression à l'échelle dans une usine d'épuration par boues activées de 1 mg/j (3 785 m^3/j) dans le comté de Prince William en Virginie, États-Unis. Cette étude établissait une comparaison du coût associé à la clarification par flottation à celui de la décantation par gravité plus l'épaississement par flottation.

Du point de vue des coûts, les critères de conception choisis pénalisaient la technique de flottation sous pression (charges faibles) et favorisaient la décantation (charges élevées). Le résumé suivant des charges utilisées par Mulbarger et Huffman révèle ceci: dans le cas de la flottation, une charge hydraulique de 0,25 gpm/pi^2 (0,17 L/m^2•s) et une période de séjour de 3,4 h sont les chiffres qui ont été utilisés, alors que ceux utilisés pour la décantation étaient de 0,42 gpm/pi^2 (0,29 L/m^2•s) et 2,3 h respectivement.

À l'aide de ces critères, les auteurs ont estimé que les coûts en capital et en énergie dans le cas de la flottation sous pression étaient environ deux fois plus élevés que ceux afférents à la décantation suivie de l'épaississement par flottation des boues de déchet activées. Les coûts afférents à la flottation sous pression n'étaient que le double de ceux associés à la décantation, parce qu'il n'a pas été nécessaire d'enfermer les unités de flottation de cette usine de Virginie dans un bâtiment comme dans les emplacements situés plus au nord.

En 1974, Mennel a rédigé un rapport sur une usine pilote de laboratoire fonctionnant en discontinu qui utilisait la floculation par la chaux pour l'effluent primaire,

suivie da la flottation sous pression. Le premier objectif de cette expérience était la déphosphoration. On a estimé que si on ajoutait au processus l'absorption du carbone et la désinfection, on obtiendrait des coûts afférents à l'usine de 0,26$/1 000 gal. (0,07$ par m^3) d'eaux d'égouts traitées dans une usine d'une capacité de 10 x 10^6 gals/j (38 000 m^3/j). Comme les coûts annuels en 1974 pour une usine d'épuration par boues activées ordinaire de cette taille, avec application de la déphosphoration, variaient entre 0,08$ et 0,10$/$m^3$ d'eaux d'égouts traitées, les estimations de Mennell laissent entendre que le procédé physique/chimique proposé incluant la flottation sous pression ferait concurrence aux processus ordinaires.

Snider a décrit en 1975 une autre application impliquant des facteurs économiques visant la séparation par flottation. Une unité de flottation sous pression à l'échelle de 7,5 m de diamètre entièrement mise sous pression, utilisée pour extraire les algues d'un étang aéré, a été remplie durant une période de 11 heures par jour à un rythme d'environ 3 gpm/pi^2 (2 L/m^2•s.). Les coûts d'exploitation afférents à l'addition d'alun (125 mg/L) et pour l'énergie représentaient 0,06$/1000 gal (U.S.) (1,6 ¢/$m^3$) d'eaux d'égouts traitées. Les coûts en capital de 130 000$ démontraient que la technique de flottation sous pression était un "moyen rentable" d'extraire les algues des systèmes d'eaux d'égouts. Cependant, les coûts présentés ne comprenaient pas ceux afférents à un bâtiment, aux pompes d'alimentation et pour l'effluent, ou les dispositifs de contrôle nécessaires. De plus, il n'y a eu aucune présentation des coûts correspondants pour des systèmes de remplacement comme la filtration, de sorte que l'attrait que présente la flottation sous pression dans cette étude n'est pas convenablement étayé.

En 1974, W.F. McMichael a effectué un examen approfondi des coûts afférents à l'épaississement par flottation des boues activées décantées dans les usines d'épuration des eaux d'égouts municipales. Les critères de conception (avec les agents de flottation) et les coûts associés à l'équipement, ont été fournis par Komline-Sanderson et Rex Chainbelt et les coûts d'installation, par un entrepreneur général. Des graphiques représentant les coûts en capital et les coûts d'exploitation et d'entretien sont présentés et sont basés sur la capacité nominale de l'usine d'épuration des eaux d'égouts. Y sont aussi inclus les coûts de construction associés aux terrains, les besoins en main-d'oeuvre et les coûts en matériel par superficie d'épaississeur ou par quantité annuelle de boues épaissies. Les coûts en capital comprennent les coûts pour les bâtiments et réservent 20 pour cent des coûts de construction pour les frais de génie, juridiques et administratifs et 14 pour cent des coûts de construction pour une part proportionnée du travail sur le

chantier de l'usine d'épuration. Cet excellent rapport contient des données utiles pour l'évaluation des coûts visant l'épaississement par flottation.

Campbell (1978) at al. ont aussi étudié les coûts afférents à l'épaississement par flottation. La méthode suivie consiste à utiliser les principaux coûts afférents à l'équipement plus les facteurs importants (propres au type d'équipement) associés à l'installation, aux assurances, au profit, etc. Par exemple, le facteur suggéré pour le coût en capital afférent à l'épaississement par flottation sous pression (sans les bâtiments) est 2,36 fois le coût FOB de l'équipement principal. Bien que la méthode d'estimation par les facteurs des coûts généraux puisse servir de guide général, elle a une valeur limitée dans les comparaisons des coûts détaillés où les facteurs à l'échelle, les conditions de l'emplacement et d'autres facteurs influençables locaux finaux peuvent avoir une importance.

3.9 Recherches en cours

L'activité de certaines des personnes engagées dans la recherche sur la flottation sous pression est présentée brièvement ci-dessous afin d'indiquer quelles sont les directions prises dans les recherches sur la flottation sous pression.

Les chercheurs sud-africains ont, depuis de nombreuses années, été les pionniers dans la recherche sur la flottation. Van Vuuren et al. (1968) et Stander et van Vuuren (1970) sont souvent cités pour leur travail sur l'utilisation de la flottation pour le traitement tertiaire des effluents et pour leurs contributions générales à la théorie et à la pratique de la flottation. Plus récemment, Bratby et Marais (1975) ont publié un article sur les recherches fondamentales effectuées sur les facteurs affectant le comportement de la flottation et la dissolution de l'air dans le liquide recirculé. Ils ont mis au point de nouvelles méthodes pour saturer l'air et mesurer le pourcentage de saturation.

Davis (1977) enquête sur l'utilisation de la flottation sous pression aux fins de clarification de la liqueur mixte. Des expériences pilotes ont été effectuées à l'aide d'unités de flottation sous pression Komline-Sanderson de tailles diverses sur la liqueur mixte provenant d'une usine d'aération prolongée ayant une période de séjour de 25 jours. On s'est aperçu que la biofloculation naturelle des boues rendait non nécessaire les agents de flottation. On a planifié la construction d'un équipement de flottation sous pression afin de desservir une usine d'une capacité de 150 000 m^3/j qui incluera l'élimination de l'azote organique et du phosphore.

Le Water Research Centre (WRC) à Medmenham en Angleterre effectue actuellement des expériences sur l'utilisation de la flottation sous pression pour le traitement des eaux. Les chercheurs du Centre ont mis au point une unité de flottation de laboratoire d'usage multiple, de même qu'un ajutage (breveté à titre d'ajutage WRC) pour introduire de l'eau recirculée chargée d'air dans l'affluent. Présentement (1977), le WRC coordone des études à grande échelle sur la flottation (2 300 m^3/j) avec cinq autorités en matière d'eau, afin de déterminer s'il est possible d'utiliser la technique de flottation sous pression pour le traitement des eaux à une très grande échelle (Hyde, 1977).

Le Swiss Federal Institute for water Resources and Water Pollution Control (Eidgenossische Technische Hochschulen) a participé aux recherches sur la flottation sous pression, principalement en ce qui a trait à la production de bulles, à la répartition de la taille des bulles et aux mécanismes de fixation des bulles. Les données préliminaires sur l'influence de la turbulence sur les niveaux de précipitation et le dosage des noyaux des bulles de gaz aux fins de contrôle de la taille des bulles ont indiqué un certain succès en termes de turbidités faibles des matières résiduelles, mais les travaux ont été annulés.

E.R. Hayes de l'université d'Acadia à Wolfville, Nouvelle-Écosse examine en ce moment la technique de flottation pour la décoloration des effluents des moulins à papier transportant des floculants organiques. Aucun résultat n'est disponible encore.

La plupart des fabricants d'équipement de flottation sous pression dirigent leurs propres programmes de recherches. Komline-Sanderson, avec plus de 350 unités de flottation sous pression en service, a dominé le domaine municipal dans l'épaississement par flottation des boues activées. Les efforts des entreprises dans la recherche ont été dirigés vers l'optimisation du comportement de l'épaississement et l'amélioration du système de saturation d'air. Avec la méthode brevetée de K-S, on prétend avoir obtenu des niveaux de saturation de 95 pour cent, c'est-à-dire des résultats semblables à ceux obtenus avec les sytèmes "packing". Il semble que le système de K-S n'ait pas tendance à se boucher. Eimco Envirotech a aussi dirigé ses principales recherches sur l'efficacité du système de saturation d'air.

Imperial Chemical Industries (ICI) favorise la technique de la microflottation mise au point en Suède par Electrolux à la suite de recherches. Ces unités, dont les avantages sont les faibles besoins en énergie et les coûts d'exploitation bas, utilisent un bassin de 8 à 15 m de profondeur par lequel passe le liquide et est introduit l'air à basse pression. Le débit hydraulique régit la conception normale (aucune recirculation) qui a pour but d'extraire les matières solides plutôt que d'épaissir. Pour l'utiliser comme

épaississeur de boues, il faut augmenter l'aération et se servir de la recirculation. Les 24 usines en exploitation (1977) démontrent le succès de cette technique pour le traitement des eaux.

Depuis 1952, Rexnord (et son prédécesseur Rex-Chainbelt) a concentré ses recherches sur l'épaississement plutôt que la séparation, parce qu'il jugeait que les coûts d'exploitation élevés ne pouvaient être justifiés que dans les cas où l'extraction de l'huile ou de la graisse ou l'espace limité rendaient nécessaire l'utilisation de la technique de la flottation pour la séparation. Cependant, le traitement par flottation des trop-pleins d'égoûts pluviaux a fait l'objet d'expériences durant plusieurs années et les études sur l'élimination par flottation des traces d'impuretés dans l'effluent des étangs remplis d'algues viennent de se terminer. Selon les rapports, l'élimination des traces d'impuretés dans l'effluent s'est avérée assez satisfaisante, bien qu'aucun renseignement détaillé à ce sujet n'ait été communiqué.

Ingersoll-Rand ont mis au point, à la suite de recherches, un bassin d'épaississement par flottation verticale et circulaire avec un écoulement se faisant dans le sens contraire des bulles montantes. Selon les dires, ce modèle unique peut recevoir des charges hydrauliques et des matières solides plus élevées avec des rapports de recirculation et air/matières solides plus bas que ceux des unités de flottation sous pression ordinaires. Bien que cette technique semble prometteuse, ses applications jusqu'à maintenant sont limitées et aucune ne vise la clarification des eaux usées municipales.

Permutit offre le modèle à "lamelles" pour la flottation, dans lequel les plaques verticales et longitudinales (ou lamelles) installées dans l'unité de flottation sous pression horizontale maintiennent l'écoulement laminaire en diminuant le rayon hydraulique. Ceci permet de doubler la charge hydraulique appliquée aux unités ordinaires. Une étude d'une durée de deux ans sur la clarification de la liqueur mixte a indiqué que l'unité de Permutit Favair II coûtait moins cher au départ et nécessitait moins de coagulants que les unités de flottation sous pression ordinaires. Malheureusement, les résultats limités ne permettent pas de tirer des conclusions valables. Permutit, cependant, ne recommande pas l'utilisation de la flottation aux fins de clarification dans les usines de grosses dimensions, à cause des besoins élevés en énergie pour le pompage.

3.10 Documentation des fabricants

Le tableau 1 donne un résumé des renseignements contenus dans la correspondance, les brochures et les autres données provenant des fabricants qui ont apporté leur

TABLEAU I CRITÈRES AFFÉRENTS À LA TECHNIQUE DE FLOTTATION SOUS PRESSION ET COMPORTEMENT PRÉVU AVEC L'UTILISATION D'ADJUVANTS DE FLOCULATION

	Charge nominale					Matières solides en suspension dans l'effluent			
	HYD. (m/h)	Matières solides ($kg/m^2 \cdot h$)	Rapport maximal de recirculation	Rapport maximal air/matières solides	Pression maximale (kPa)	Boues activées décantées (10 000 mg/L)	Eaux d'égouts (200 mg/L)	Liqueur mixte (4 600 mg/L)	Liqueur mixte (2 800 mg/L)
Komline-Sanderson	2,20	9,8	2	,038	480	500	NR	230	140
Rexnord	0,9*	9,8	1	,014	280	1600	90	NR	NR
Envirotech	4,89	9,8	2	,02	520	500	60	250	200
Permutit	12,23	14,6	AUCUN	NF	480	NF	NF	NF	NF
Ingersoll-Rand	19,56	73,2	1	,02	690	50	NR	NF	NF
Imperial Chemical Industries	7,09	9,8	NIL**	NF	170	NF	NF	NF	NF

* Vitesse horizontale en m/min
** Critères afférents à la clarification, aucun adjuvant de floculation
NR Non recommandé par le fabricant
NF Non fourni par le fabricant

coopération à cette étude. Les rendements prévus qui y sont indiqués ne sont pas des valeurs sûres, mais simplement des prédictions effectuées par les fabricants sur la façon dont leur équipement fonctionnera dans des conditions spécifiques avec un coagulant. Dans la plupart des cas, une concentration moyenne du floc de quatre pour cent était donnée pour l'épaississement (que ce soit avec des quantités de matières, de boues activées décantées de 10 000 mg/L ou de liqueur mixte de 4 600 mg/L) et la clarification (de quantités de matières d'eaux d'égouts de 200 mg/L ou de liqueur mixte de 2 800 mg/L), de sorte que le pourcentage de concentration du floc n'apparaît pas dans le tableau.

Trois fabricants, soit Komline-Sanderson, Rexnord et Envirotech, offrent un équipement typiquement comparable aux unités de flottation sous pression exploitées en ce moment. Trois autres fabricants, soit Permutit, Ingersoll-Rand et Imperial Chemical, offrent des modèles uniques qui sont le fruit de leur propres recherches. Les unités de flottation sous pression existent généralement sous forme de bassins d'acier préfabriqués d'une superficie de 37 m^2 et en diverses grandeurs pour l'installation dans les bassins de béton.

4 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET APPAREILS

4.1 Trois phases

Comme il a été mentionné dans la section 2, une étude de praticabilité a été effectuée sur l'utilisation de la flottation sous pression pour traiter les déchets provenant de trois sources. Par conséquent, il était logique de diviser l'étude en trois phases distinctes basées sur les provenances des eaux d'égouts:

Phase 1 - Aération prolongée
Phase 2 - Eaux d'égouts
Phase 3 - Épuration ordinaire par boues activées

4.2 Équipement propre aux trois phases

4.2.1 Unité de flottation sous pression de laboratoire fonctionnant en discontinu. Au lieu de l'unité traditionnelle à deux cylindres ou unité "bomb", on a utilisé un dispositif à trois cylindres fonctionnant en discontinu, mis au point par Wood et Dick (1973), lequel a été quelque peu modifié. Cet appareil a été utilisé avec succès dans une étude effectuée antérieurement par Gehr and Henry (1976).

La figure 1 représente un dispositif de flottation en fonctionnement discontinu à trois cylindres. La principale modification qui a été apportée au dispositif de Wood et Dick a été l'addition d'un indicateur d'oxygène dissous au cylindre sous pression. L'annexe B donne une description de cet indicateur. La mesure de l'oxygène dissous a été utilisée pour obtenir une indication directe du pourcentage de saturation d'air dans le liquide mis sous pression. Bratby et Marais (1975) ont démontré que la présence de matières solides dans le liquide mis sous pression n'affecte pas la quantité d'air évacué durant la flottation. Ainsi, bien que la quantité d'air contenue dans le liquide recirculé (appelé "recirculé" parce qu'il est équivalent au liquide recirculé mis sous pression dans des dispositifs fonctionnant en continu) ait été mesurée avant d'avoir été mélangée avec les boues, on suppose que cette quantité d'air sera réellement égale à celle relâchée et destinée à la flottation.

D'autres modifications mineures apportées à l'appareil de Wood et Dick ont porté sur les dispositions de soupapes et des tubes et sur l'utilisation d'un cylindre de flottation de diamètre supérieur (140 mm au lieu de 63 mm) pour toutes les expériences.

Dans le cas des expériences où du $FeCl_3$, de l'alun et de la chaux ont été utilisés, ceux-ci ont été ajoutés à l'affluent (c'est-à-dire la liqueur mixte ou les eaux

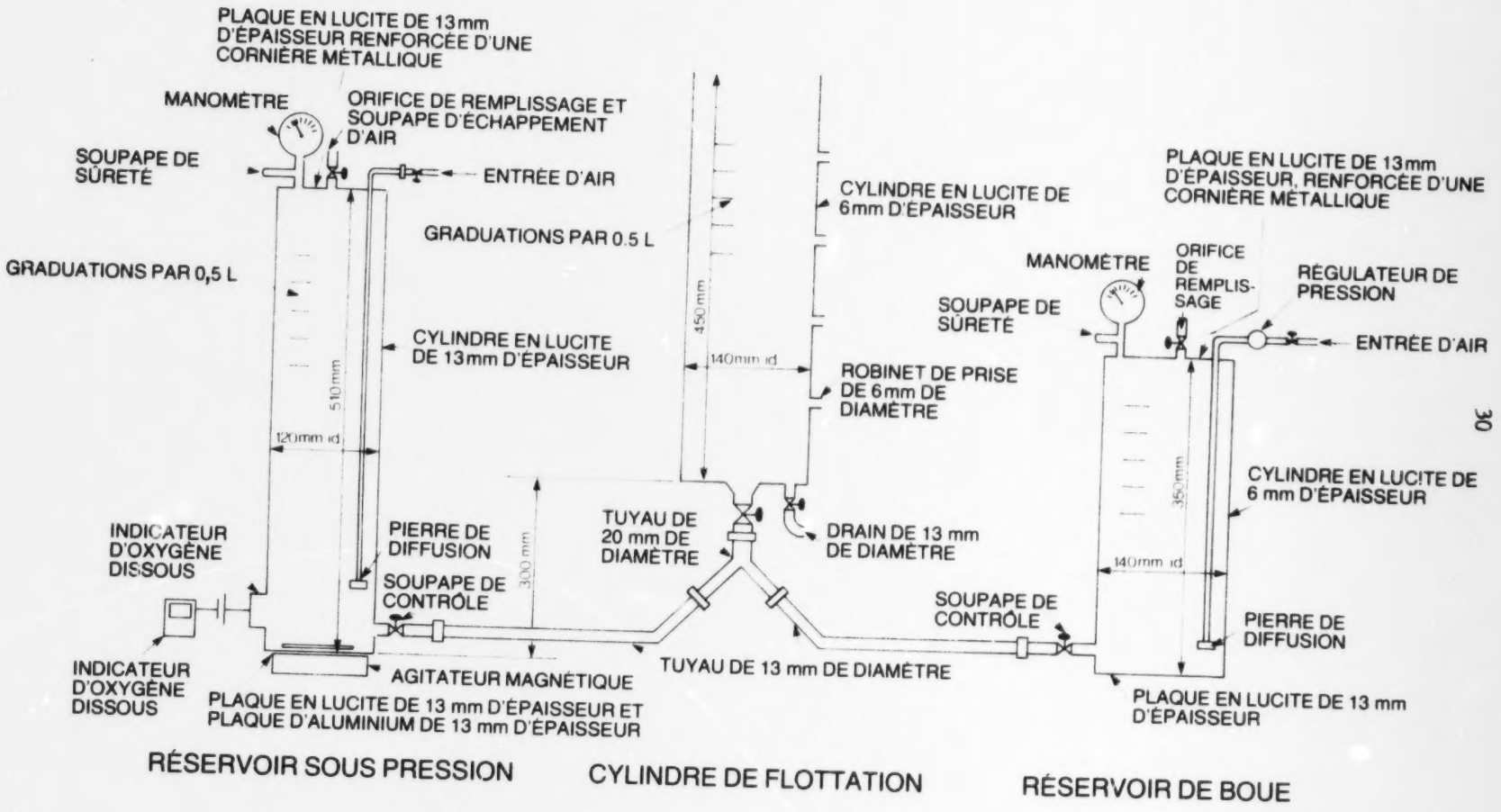


FIGURE 1 UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION DE LABORATOIRE FONCTIONNANT EN DISCONTINU

d'égouts) avant le processus de flottation. Le mélange a été brassé rapidement durant trois minutes, puis ensuite lentement durant 27 minutes, afin d'obtenir un floc approprié.

4.2.2 Unité pilote de flottation sous pression fonctionnant en continu. Le dispositif pilote de flottation sous pression fonctionnant en continu qui a été utilisé pour les trois phases a été l'unité de flottation sous pression SR 15 Komline-Sanderson. La figure 2 donne un schéma du système, de même que de l'équipement auxiliaire, et la figure 3, un schéma de l'unité elle-même.

La superficie nominale du bassin de flottation, qui était au départ de 1,39 m^2, a été réduite à 0,836 m^2, afin d'avoir une charge hydraulique d'une plus grande souplesse lors de l'utilisation des installations existantes de dimensions restreintes pour l'alimentation en eaux d'égouts et en liqueur mixte. Les dimensions réelles étaient de 1,14 m sur 0,75 m sur 1,15 m de profondeur, donnant ainsi une superficie de 0,856 m^2 et une capacité de 0,984 m^3. Le mécanisme de raclage servant à enlever les boues flottantes était une chaîne continue munie de trois racloirs; la vitesse était de 1,8 m/min et était contrôlée par une minuterie automatique. Les pompes de recirculation et de réaération étaient mues par des moteurs de 3,7 kW et 0,56 kW respectivement. Le réservoir sous pression avait une capacité de 160 L et la pression de fonctionnement variait entre 330 kPa et 400 kPa. De l'air mis sous une pression de 550 kPa a été insufflé dans le tuyau de recirculation vers le réservoir et le niveau d'eau dans le réservoir sous pression a été contrôlé automatiquement. L'air et le liquide ont été mélangés sous une pression élevée à l'aide de la pompe de recirculation, laquelle poussait le liquide dans un éjecteur situé à l'intérieur du réservoir et créait un niveau de saturation d'environ 60 pour cent pour l'action d'un tuyau venturi. Le débit du liquide recirculé, mesuré à l'aide d'un débitmètre magnétique, était contrôlé par un diaphragme situé à la sortie du réservoir sous pression. L'oxygène dissous contenu dans le liquide chargé d'air était mesuré par un indicateur d'oxygène dissous, relié à un canal de dérivation au-dessus de la soupape de contrôle du liquide recirculé.

Le système de flottation fonctionnait 24 heures sur 24 et deux groupes d'échantillons ont été relevés chaque jour normal d'exploitation. Le cycle s'est répété durant 2 1/2 semaines.

4.2.3 Équipement auxiliaire. Un polymère a été mélangé dans une solution pour obtenir une concentration de 0,1 pour cent (1 g/L) et a été mis dans le liquide recirculé juste avant que ce dernier ne soit mélangé avec l'affluent de l'unité de flottation sous

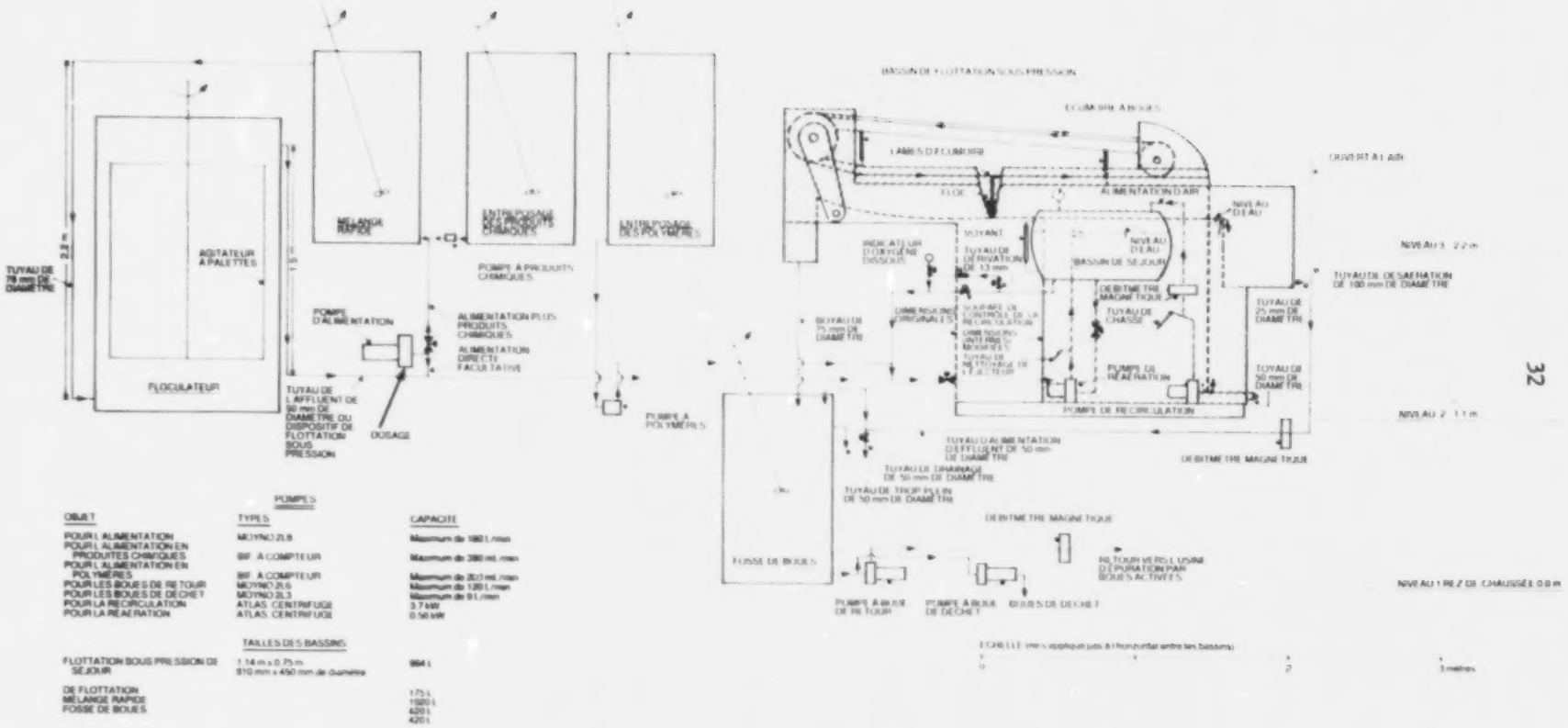


FIGURE 2 DIAGRAMME DE L'USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION FONCTIONNANT EN CONTINU

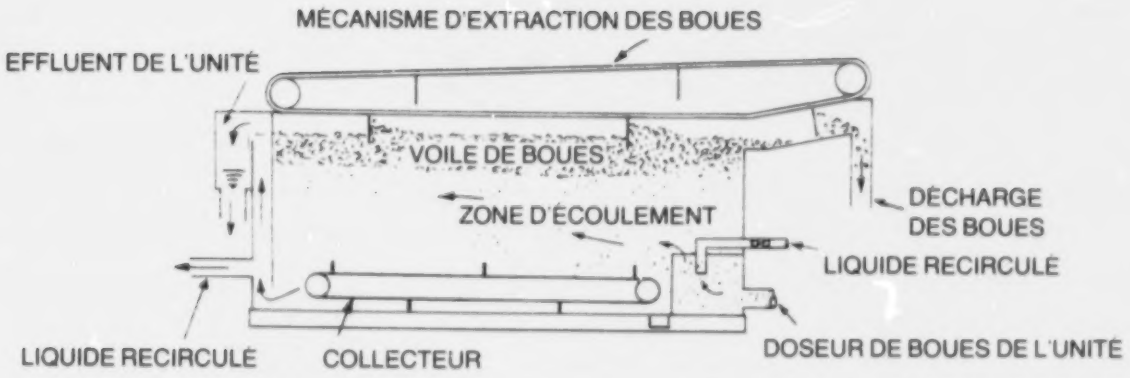


FIGURE 3 DIAGRAMME DE L'ÉCOULEMENT INTERNE, UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION SR 15 DE KOMLINE-SANDERSON

pression. Une pompe à compteur BIF d'une capacité maximale de 390 mL/min a été utilisée et son débit a pu être mesuré en tout temps à l'aide d'une colonne graduée.

Bien qu'il est de pratique courante dans le traitement des eaux d'égouts d'ajouter des produits chimiques pour la déphosphoration dans le bassin d'aération, on s'est penché dans cette étude sur la déphosphoration en elle-même et sur les effets que pourrait avoir un produit chimique sur le comportement de la flottation. Ainsi, le produit chimique a été ajouté dans un bassin de mélange rapide et de floculation combiné, avant que les eaux usées n'arrivent à l'unité de flottation sous pression. Ce même système a pu ensuite être utilisé pour la partie de l'étude portant sur les eaux d'égouts, où, de toute évidence, le bassin d'aération ne pouvait pas servir pour effectuer le mélange. Le bassin de mélange rapide avait une capacité de 0,42 m^3 et le floculateur, muni d'un agitateur à palettes à fonctionnement lent, avait une capacité de 1,92 m^3. En se basant sur les essais de floculation et de flottation en fonctionnement discontinu, on a choisi le chlorure ferrique aux fins de déphosphoration à l'usine pilote et, pour des raisons de commodité, on l'appelera simplement "produit chimique". On a déterminé que le nombre de molécules d'eau liée était de six. Le chlorure ferrique a été mis dans une solution et ajouté dans le bassin de mélange rapide à l'aide d'une pompe à compteur BIF d'une capacité de 200 mL/min.

La quantité d'oxygène a été mesurée à l'aide d'un indicateur d'oxygène dissous Beckman Model 7002. L'indicateur était inséré dans une chambre de séjour qui faisait

fonction de dérivation pour le fluide se dirigeant vers la soupape de contrôle du liquide recirculé. De cette façon, la pression contre la membrane de l'indicateur était créée par la différence de charge à travers la soupape de contrôle et n'a pas excédé 138 kPa. Les procédures suivies en matière de mesures sont exposées en détails dans l'annexe A.

Les débits de l'affluent, de l'effluent, du liquide recirculé et des boues de retour ont été mesurés à l'aide de débitmètres magnétiques.

4.2.4 Études avec colorants. Des études avec colorants ont été effectuées à l'usine pilote de flottation sous pression avant que les modifications n'y soient apportées (c'est-à-dire avec une superficie de 1,39 m^2) et sur l'unité utilisée pour l'étude (c'est-à-dire avec une superficie de 0,86 m^2). On a utilisé du rhodamine WT dans de l'eau fraîche comme teinture fluorescente. Des doses du colorant ont été injectées par impulsion dans l'unité, et l'effluent a été observé à l'aide d'un fluoromètre et d'un enregistreur.

Comme les études avec traceurs (colorants) ont été effectuées auparavant sur l'usine pilote de flottation sous pression (Huether, 1974), l'objet de ces tests n'était que de comparer les caractéristiques des bassins de grande et de petite dimensions. Les études plus récentes avaient montré que l'écoulement qui se faisait par le bassin de plus grosse dimension affichait les caractéristiques les plus proches de l'écoulement mélangé idéal, que, suite à un mélange adéquat, le débit du liquide recirculé devrait être égal ou supérieur au débit de l'affluent, et que la charge hydraulique totale maximale ne devrait pas dépasser 227 L/min. L'annexe C présente les résultats des études avec colorants. La conclusion qui a été tirée est la suivante: le nouveau dispositif d'admission d'eau réduit ou élimine le court-circuitage et le bassin plus petit devrait avoir des caractéristiques hydrauliques semblables à celles du plus gros, c'est-à-dire que le liquide peut être considéré comme bien mélangé et approprié pour l'application de la flottation.

Il faut prendre note que ces tests avec colorants ne tiennent pas compte des tendances d'écoulement produites par les flocs des boues montantes. Leur objet était de déterminer s'il était possible qu'il y ait court-circuitage et que le floc soit transporté avec l'effluent. Les tests ont démontré qu'il était peu probable que cela se produise; l'effet des lignes de courant engendrées par les flocs montants réduirait en fait les risques d'entraînement (primage).

4.2.5 Essais de floculation. Un des buts de l'étude sur la flottation était d'évaluer les conséquences qu'auraient les déphosphorants sur le comportement de la flottation. L'efficacité réelle d'un produit chimique particulier utilisé pour la déphosphoration n'était

pas une préoccupation majeure, mais on a jugé que des essais simples devaient être effectués pour sélectionner le produit chimique qui serait probablement utilisé pour la déphosphoration. L'essai le plus approprié pour déterminer ce produit chimique était l'essai de floculation. Cependant, il faut faire remarquer qu'il se peut que le meilleur produit chimique utilisé pour la déphosphoration durant la décantation, comme illustré par les essais de floculation, ne soit pas le meilleur pour effectuer la déphosphoration lorsque la technique de flottation sous pression est appliquée. Il serait nécessaire d'effectuer une étude d'ensemble afin d'évaluer les relations réciproques qui existent entre l'efficacité de la déphosphoration et les conséquences d'un produit chimique particulier sur la flottation. Ces relations réciproques ont été brièvement étudiées à l'aide d'un dispositif de flottation fonctionnant en discontinu.

L'appareil utilisé pour les essais de floculation consistait en une centrifugeuse standard Phipps et Bird à six compartiments et une table lumineuse. Des pots carrés d'une capacité d'un litre, de 90 mm sur 90 mm ont été utilisés. La vitesse de la centrifugeuse a été réglée à 100 tpm pendant trois minutes et ensuite à 3 tpm pendant 27 minutes,et ensuite un repos de 30 minutes. Des mesures du phosphore total et dissous dans le liquide original et le liquide surnageant ont été effectuées. Le choix final du produit chimique, sujet à la ratification par les tests avec un dispositif de flottation sous pression fonctionnant en discontinu, a été basé sur le coût, la fréquence d'utilisation dans les usines d'épuration de l'Ontario et la facilité d'utilisation. Les résultats de toutes les phases sont présentés dans l'annexe D et serviront brièvement au besoin dans chaque phase.

4.3 Phase I (Aération prolongée)

4.3.1 Équipement propre à cette étape. La liqueur mixte provenait d'une usine pilote d'aération prolongée (figure 4) où elle était soumise à une période de séjour de 24 heures et était amenée au rythme de 91 L/min. Le rapport matières organiques/micro-organismes était d'environ 0,03/j. L'aération produite par des diffuseurs submergés maintenait la quantité d'oxygène dissous au-dessus de 2 mg/L et comme le réservoir de réaction était divisé en compartiment, on s'attendait à ce que l'effluent ait tendance à s'écouler en bloc, plutôt que de se mélanger complètement.

L'effluent du bassin d'aération a été pompé directement de la sorte du bassin d'aération vers le dispositif de flottation sous pression. Après le processus de flottation, les deux substances séparées (ce qui flotte et ce qui est immergé) ont été combinées dans une fosse et pompées vers l'entrée du bassin d'aération. De cette façon, le débit

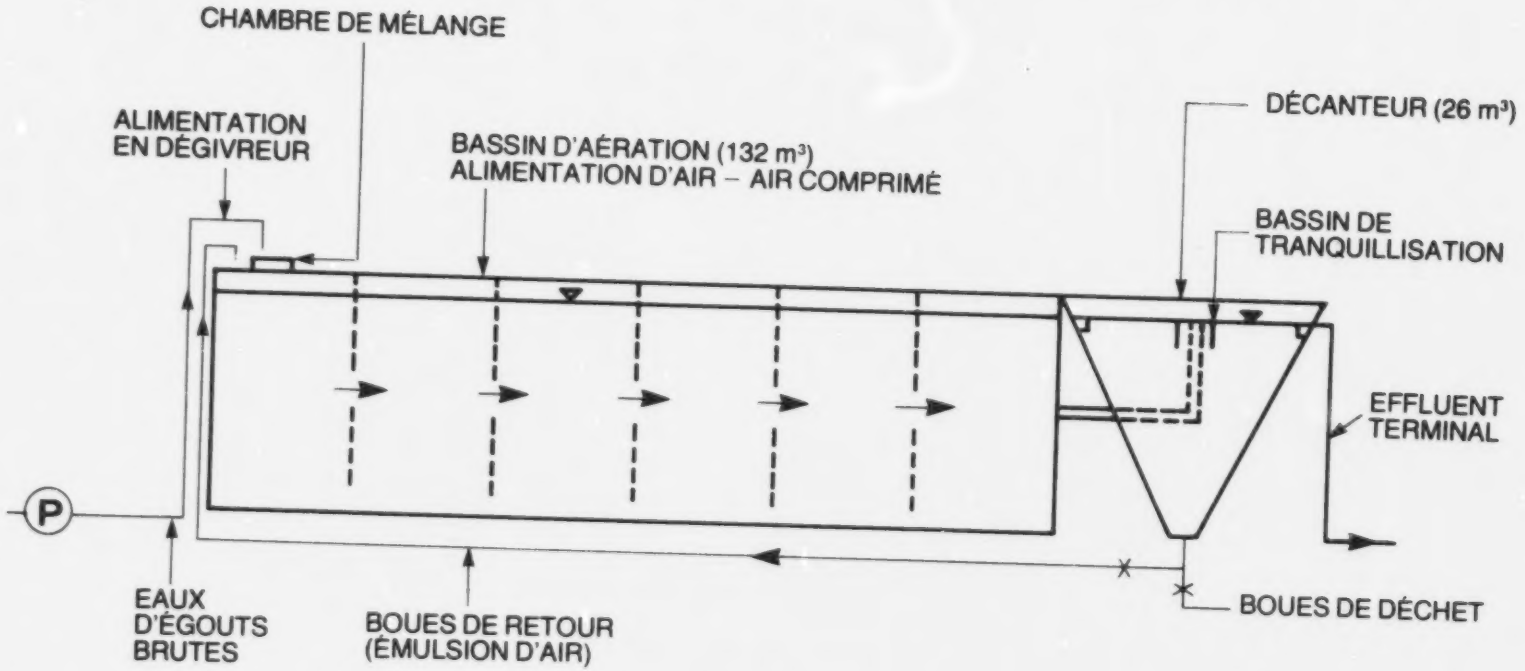


FIGURE 4 USINE PILOTE À AÉRATION PROLONGÉE (JANK et al., 1974)

alimentant le système de flottation pouvait être varié tout en maintenant à une charge constante le fonctionnement de l'usine pilote à aération prolongée.

4.3.2 Contraintes. Les problèmes de fonctionnement qu'il y a eu au début et les modifications qui ont été apportées à l'usine pilote de flottation sous pression ont entraîné de sérieux retards durant cette phase de l'étude (voir la section 5,3). Après avoir obtenu un fonctionnement stable, les expériences ont pu être effectuées durant deux semaines avant que l'usine pilote d'aération prolongée ne soit mise en arrêt à cause du temps.

4.3.3 Essais de floculation. À l'aide de l'appareil décrit dans la section 4.2.5, on a effectué des essais avec les agents de déphosphoration et les dosages suivants:

Alun: 60, 120, 150, 180, 240 mg/L
Chlorure ferrique: 5, 10, 15, 20, 40, 60, 120, 150, 180, 240 mg/L
Chaux: 60, 120, 150, 180, 240 mg/L

Un contrôle (aucun produit chimique n'a été ajouté) a été effectué pour chaque groupe de cinq essais de floculation, c'est-à-dire un pour l'alun et la chaux et deux pour le chlorure ferrique. Le liquide surnageant a été soumis à des essais pour connaître la quantité de phosphore totale et soluble.

4.3.4 Essais de flottation en discontinu. Les essais de flottation en fonctionnement discontinu ont été effectués sur la liqueur mixte afin d'obtenir les valeurs approximatives d'exploitation pour l'usine pilote. Les facteurs étudiés ont été le rapport air/matières solides (A/MS), le type de polymère et son dosage et l'effet de ces trois agents de déphosphoration sur le comportement de la flottation. Les paramètres utilisés pour déterminer le comportement de la flottation étaient les concentrations de floc et de matières solides dans l'effluent, le paramètre d'épaississement (défini dans l'annexe A) et la réduction du phosphore soluble.

Voici le programme expérimental qui a été suivi:

1) Déterminer le A/MS optimal; 11 tests.
   Pressions: 207, 276, 310 et 345 kPa.
   Rapport A/MS: 0,00618 à 0,0261.
2) Choix du polymère; 31 tests, 10 polymères:
   Percol: 728, 744, 751, 757.
   Calgon: WT 2870, E 270L, Catfloc A
   Hercofloc: 834, 849, 855.

3) Déterminer la dose optimale du polymère; 12 essais.

4) L'effet du produit chimique ajouté (pour la déphosphoration) conjointement avec le polymère choisi (Percol 757). Douze essais ont été effectués avec des doses élevées et faibles d'alun, de chlorure ferrique et de chaux conjointement avec le polymère à diverses concentrations. Les concentrations utilisées font l'objet d'une discussion dans la section 5.2.4 et sont présentées dans le tableau 12.

5) Trois tests pour déterminer l'effet du produit chimique ajouté (produit chimique optimal, c'est-à-dire le chlorure ferrique) sur la flottation sans polymère.

4.3.5 Tests pilotes. L'usine a été mise en route cinq fois, entraînant chaque fois une panne et des modifications à l'usine. Les modifications comprenaient:

a) remplacer la soupape munie d'une membrane de 37 mm d'épaisseur utilisée pour contrôler le débit du liquide recirculé par une soupape munie d'une membrane de 19 mm d'épaisseur;

b) abaisser le niveau du liquide dans le bassin de flottation en enlevant la plaque du déversoir;

c) réduire la vitesse de l'agitateur à palettes afin d'assurer un fonctionnement continu (à sa vitesse originale, le moteur de l'agitateur s'endommageait périodiquement, entraînant l'anaérobiose dans le bassin de floculation et permettant à des blocs de matières solides d'entrer dans le bassin de flottation);

d) installer des soupapes appropriées pour permettre à l'éjecteur de se nettoyer durant le fonctionnement de l'usine (voir figure 8);

e) installer une chambre de récupération de matières solides et de cheveux avant le bassin sous pression, afin de réduire les bouchons dans les canalisations.

Voici le programme expérimental qui a été suivi:

1) Variation du rapport A/MS

Rapport A/MS variant entre 0,0102 et 0,0381

Rapport de recirculation variant entre 0,86 et 4,17

Nombre de tests effectués: 11

Conditions de fonctionnement exposées dans le tableau 2.

2) Effets des produits chimiques ajoutés:

Produit chimique ajouté: $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

Doses variant entre 15 et 60 mg/L

Conditions de fonctionnement: voir le tableau 3.

TABLEAU 2 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS DE LA VARIATION DU RAPPORT A/MS
PHASE 1 - USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION

	Dose du polymère (mg/g)	Pression (kPa)	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Débit de l'affluent (L/min)	Charge hydraulique (m/h)	Charge de matières solides ($kg/m^2 \cdot h$)
Moyenne	0,92	380	4500	32	2,27	10
σ	0,076	14	183	-	-	0,45

TABLEAU 3 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS DU PRODUIT CHIMIQUE AJOUTÉ.
PHASE 1 - USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION

	Dose du polymère (mg/g)	Pression (kPa)	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Débit de l'affluent (L/min)	Charge hydraulique (m/h)	Charge de matières solides ($kg/m^2 \cdot h$)	A/MS
Moyenne	0,86	386	4750	32	2,27	10,8	0,030
σ	0,03	-	145	0	0	0,34	0,005

3) Effets des charges élevées, sur le dispositif de flottation sous pression, et faible dose du polymère et rapport A/MS bas. Les détails relatifs aux tests sont présentés dans le tableau 4.

4.4 Phase 2 (eaux d'égouts)

4.4.1 Équipement propre à cette phase. Les eaux d'égouts tamisées provenaient de l'usine d'épuration des eaux d'égouts Skyway de Burlington. Cette usine traite surtout les eaux d'égouts d'une population de 75 000 habitants.

4.4.2 Contraintes. La qualité des eaux d'égout, en termes de matières solides en suspension et de DCO (matières solides en suspension, 60 - 500 mg/L; DCO 130 - 750 mg/L) variait tellement qu'il a été impossible de séparer les effets qu'avaient les variables contrôlées, comme le rapport A/MS, de cette variation de l'affluent.

Le niveau du débit alimentant l'usine pilote a été contrôlé et gardé constant durant chaque période choisie. L'effet des variations diurnes du débit sur la flottation n'a pas fait l'objet d'une étude.

4.4.3 Essais de floculation. À l'aide de l'appareil ordinaire décrit dans la section 4.2.5, les agents de déphosphoration et les dosages suivants ont été mis à l'essai:

Alun: 60, 120, 150, 180, 250 mg/L
Chlorure ferrique: 15, 25, 35, 45, 65 mg/L
Chaux: 60, 120, 150, 180, 240 mg/L

Un pot pour les essais de floculation (sans produit chimique) a été utilisé pour chacun des trois groupes de tests. Le liquide surnageant a été soumis à des tests pour déterminer la quantité de phosphore total et soluble.

4.4.4 Essais de flottation en fonctionnement discontinu. Les tests en continu ont été effectués afin d'obtenir les valeurs afférentes au fonctionnement pour l'usine pilote, et les mêmes variables utilisées dans la phase 1 ont été étudiées.

Voici le programme expérimental qui a été suivi:

1) Déterminer le rapport optimal A/MS; sept tests
   Pression: constante à 276 kPa
   Rapport A/MS: 0,0875 à 0,683
2) Choix du polymère: 52 tests, 17 polymères
   Percol: 720, 725, 726, 730, 757, 763

TABLEAU 4

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS DES CHARGES IMPOSÉES AU SYSTÈME DE FLOTTATION SOUS PRESSION
PHASE 1 - USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION

Description du test	Dose de polymère (mg/g)	Pression (kPa)	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Débit de l'affluent (L/min)	Charge hydraulique (m/h)	Charge de matières solides ($kg/m^2 \cdot h$)	Rapport A/MS	Dose de produit chimique (mg/L)
Faible dose du polymère et rapport A/MS bas	0,42	407	4500	32	2,27	10,3	0,0194	60
Dose du polymère faible et rapport A/MS élevé								
Charge hydraulique et de matières solides	0,53	379	5570	55	3,91	21,8	0,0120	60

Calgon: E207L, M540, M600, WT2690, WT2870, WT3000
Hercofloc: 812, 815,818, 831, 855

3) Déterminer la dose optimale du polymère, 13 résultats extraits de la partie (2) ci-dessus.

4) Comparer les liquides recirculés - l'eau ou l'effluent de l'usine pilote de flottation sous pression; quatre tests faits avec chaque liquide, c'est-à-dire huit tests.

5) Addition de chlorure ferrique par rapport à l'addition d'alun (aucun polymère); huit tests.

Dose de $FeCl_3$: 10, 25, 25, 40 mg/L
Dose d'alun: 40, 50, 100, 160 mg/L

6) Tests effectués avec seulement du chlorure ferrique et comparaison sans produit chimique ajouté.

Dose de $FeCl_3$: 0, 15, 30 mg/L

7) Interaction $FeCl_3$/Percol: quatre tests. Voir tableau 5.

4.4.5 Tests pilotes. À cause des concentrations extrêmement variées de matières solides dans l'affluent, les valeurs indiquées ci-dessous pour le programme expérimental sont basées sur le volume plutôt que sur la masse, c'est-à-dire mg/L au lieu de mg/g pour le dosage des polymères et sur le rapport de recirculation plutôt que sur le rapport A/MS.

Le programme expérimental a été suivi en se basant sur quatre groupes distincts de produits chimiques et (ou) de polymères ajoutés:

1) Aucune addition (tableau 6)
2) Addition d'un polymère (Percol 757 (tableau 7))
3) Addition de chlorure ferrique (tableau 8)
4) Addition d'un polymère plus du chlorure ferrique (tableau 9)

4.5 Phase 3 (Épuration ordinaire par boues activées)

4.5.1 Équipement propre à cette phase. De la liqueur mixte avec une concentration de matières solides d'environ 3 000 mg/L alimentait le bassin d'aération d'une usine pilote ayant un temps de séjour de quatre heures et un débit en fonctionnement de 91 L/min. Le rapport matières organiques/micro-organismes était d'environ 0,35. Le bassin de réaction offrait les conditions d'un mélange complet, car un seul compartiment était utilisé.

Les conditions relatives à l'aération, aux niveaux d'oxygène dissous et de pompage en provenance et en direction du dispositif de flottation sous pression étaient les mêmes que pour la phase 1.

TABLEAU 5 DOSES DU PRODUIT CHIMIQUE ET DU POLYMÈRE POUR ÉTUDIER LES EFFETS INTERACTIFS. UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2

Essai No	Dose de $FeCl_3$ (mg/L)	Dose de Percol 757 (mg/L)
1	25	0,59
2	25	1,57
3	25	1,76
4	25	2,20

TABLEAU 6 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT. AUCUNE ADDITION - USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

Débit de l'affluent (L/min)	Rapport de recirculation	Polymère (mg/L)	$FeCl_3$ (mg/L)	Nombre de tests
45	1,6	-	-	4
91	0,65 - 1,25	-	-	14
109	0,25 - 0,66	-	-	4

TABLEAU 7 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS ENTRAÎNÉS PAR L'ADDITION DU POLYMÈRE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

Débit de l'affluent (L/min)	Rapport de recirculation	Polymère (mg/L)	$FeCl_3$ (mg/L)	Nombre de tests
109	0,56	0,22	-	2
91	moyenne 1,13	0,22	-	5
91	σ 0,18	0,44	-	8
91		0,55	-	3
91		0,66	-	3
91	0,8	0,88	-	3

TABLEAU 8 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER L'EFFET ENTRAÎNÉ PAR L'ADDITION DU PRODUIT CHIMIQUE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

Débit de l'affluent (L/min)	Rapport de recirculation	Polymère (mg/L)	$FeCl_3$ (mg/L)	Nombre de tests
45	1,6	-	24	3
91	0,7	-	25	3
91	0,7	-	42	4
91	0,8	-	51	2
136	0,7	-	20	3
136	0,7	-	25	1

TABLEAU 9 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT POUR ÉTUDIER LES EFFETS ENTRAÎNÉS PAR L'ADDITION DU POLYMÈRE ET DU PRODUIT CHIMIQUE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

Débit de l'affluent (L/min)	Rapport de recirculation	Polymère (mg/L)	$FeCl_3$ (mg/L)	Nombre de tests
91	0,8	0,88	51	3
109	0,66	0,18	27	2
109	0,66	0,37	27	2
136	0,8	0,88	50	3

4.5.2 Essais de floculation. À l'aide de l'appareil standard décrit à la section 4.2.5, les agents de déphosphoration et les dosages suivants ont été mis à l'essai:

Alun: 60, 120, 150, 180, 240 mg/L
Chlorure ferrique: 10, 25, 40, 50, 60 mg/L

Un pot pour les essais de floculation (aucun produit chimique ajouté) a été utilisé pour chacun des deux groupes d'essais. Le liquide surnageant a été vérifié afin de déterminer les quantités de phosphore total et soluble.

4.5.3 Essais de flottation en fonctionnement discontinu (Voir annexe G). Des tests de flottation en discontinu ont été effectués, comme dans les phases 1 et 2, afin de déterminer les valeurs afférentes au fonctionnement pour l'unité pilote de flottation sous pression, sauf que les diverses quantités de polymères utilisées durant la première sélection ont été dosées sur une base de coûts égaux, afin de réduire le nombre de tests. Cette méthode s'est avérée meilleure que celle utilisée précédemment, laquelle se basait sur les dosages égaux.

Voici le programme expérimental qui a été suivi:

1) Déterminer le rapport optimal A/MS; six tests
   Rapport A/MS: 0,0127 à 0,0589
2) Choix du polymère; 12 tests, 12 polymères
   Percol: 720, 722, 728, 757, 763, 776
   Calgon: WT2690, WT3000
   Hercofloc: 812, 815, 849, 855
3) Comparer les deux meilleurs polymères, c'est-à-dire le Percol 728 et l'Hercofloc 849; six tests. Dans le cas des tests effectués en 2) et 3), le choix du polymère a été basé sur la concentration de matières solides dans l'effluent et le floc.
4) Déterminer le dosage optimal pour le polymère choisi, c'est-à-dire le Percol 728; six tests. Doses variant entre 0 et 1,7 mg/g.
5) Effet entraîné par l'addition de $FeCl_3$ sur le comportement de la flottation et évaluation de l'interaction du $FeCl_3$/polymère. Voir le tableau 10 pour avoir les conditions appliquées aux six tests. Le comportement a été évalué en se basant sur la concentration de floc et de matières solides dans l'effluent.

4.5.4 Tests pilotes. Comme on s'attendait à ce que la concentration de matières solides dans la liqueur mixte puisse être maintenue de façon uniforme à 3 000 mg/L et que

TABLEAU 10 DOSES DU PRODUIT CHIMIQUE ET DU POLYMÈRE POUR ÉTUDIER LES EFFETS D'INTERACTION. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 3

Test	Dose du polymère (mg/g)	Dose de $FeCl_3$ (mg/L)
1	0	0
2	0	25
3	1,9	25
4	1,9	15
5	1,7	35
6	1,7	45

les autres variables puissent être contrôlées dans des limites serrées, un programme avec un plan factoriel fractionnel de 2^{4-1} et au moins trois répétitions a formé la base du travail expérimental effectué dans cette section (Davies, 1956). Les variables indépendantes ont été choisies sur la base des tests en fonctionnement discontinu et sont présentées dans le tableau 11. Le tableau 11 donne aussi une description des tests supplémentaires effectués pour étudier des conditions précises.

TABLEAU 11 PLAN FACTORIEL FRACTIONNEL. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3

Traitement No.	Reprises	Rapport A/MS	Polymère (mg/g)	Affluent (L/min)	$FeCl_3$ (L/min)
1	4	0,028	0,88	45	25
2	4	0,028	0,88	68	0
3	3	0,028	1,39	45	0
4	3	0,028	1,39	68	25
5	4	0,041	0,88	45	0
6	3	0,041	0,88	68	25
7	4	0,041	1,39	45	25
8	4	0,041	1,39	68	0
Tests supplémentaires ("extrêmes")					
9	3	0,029	0,80	45	0
10	3	0,041	1,36	45	0
11	3	0,026	1,40	68	0
Faible dose du polymère					
12	1	0,032	0,43	45	0
13	1	0,027	0,48	68	0
14	1	0,044	0,67	68	0
15	2	0,030	0,44	45	25
Débit élevé de l'affluent					
16	3	0,020	0,91	91	0

5 RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES ET DISCUSSION - PHASE 1 (AÉRATION PROLONGÉE)

5.1 Essais de floculation

Pour les produits chimiques qui ont été vérifiés, les doses minimales nécessaires pour avoir un effluent contenant moins de 0,5 mg/L de phosphore soluble et moins de 1,9 mg/L de phosphore total étaient:

Produit chimique	Dose (mg/L)	P soluble (mg/L)	P total (mg/L)
Alun	150	0,0	0,1
$FeCl_3$	60	0,1	0,2
Chaux	120	0,3	1,0

Ces tests ont démontré clairement que le chlorure ferrique permettait d'avoir le dosage le moins élevé. Sur une base de coût unitaire, le chlorure ferrique coûte aussi moins cher (Voir annexe D).

Les caractéristiques physiques et l'acceptabilité en Ontario ont aussi été prises en considération dans le choix du produit chimique. Par exemple, la chaux n'est pas populaire, car elle est difficile à manipuler sous forme sèche ou de coulis et produit un floc lourd qui peut s'avérer difficile à faire flotter. Le chlorure ferrique est le produit chimique le plus utilisé en Ontario pour la déphosphoration.

En se basant sur les considérations susmentionnées, on en est arrivé à la conclusion que le chlorure ferrique serait le produit chimique le plus approprié pour effectuer la déphosphoration et qu'il devrait être utilisé pour étudier les conséquences qu'ont les agents de déphosphoration sur le comportement de la flottation sous pression.

5.2 Essais de flottation en fonctionnement discontinu

5.2.1 Détermination du rapport A/MS optimal. De la liqueur mixte provenant de l'usine d'épuration par aération prolongée a été utilisée comme boue d'alimentation et l'effluent provenant de la même usine, comme liquide recirculé dans les essais de flottation en fonctionnement discontinu effectués pour déterminer le rapport A/MS optimal. Les résultats sont présentés dans les figures 5 et 6.

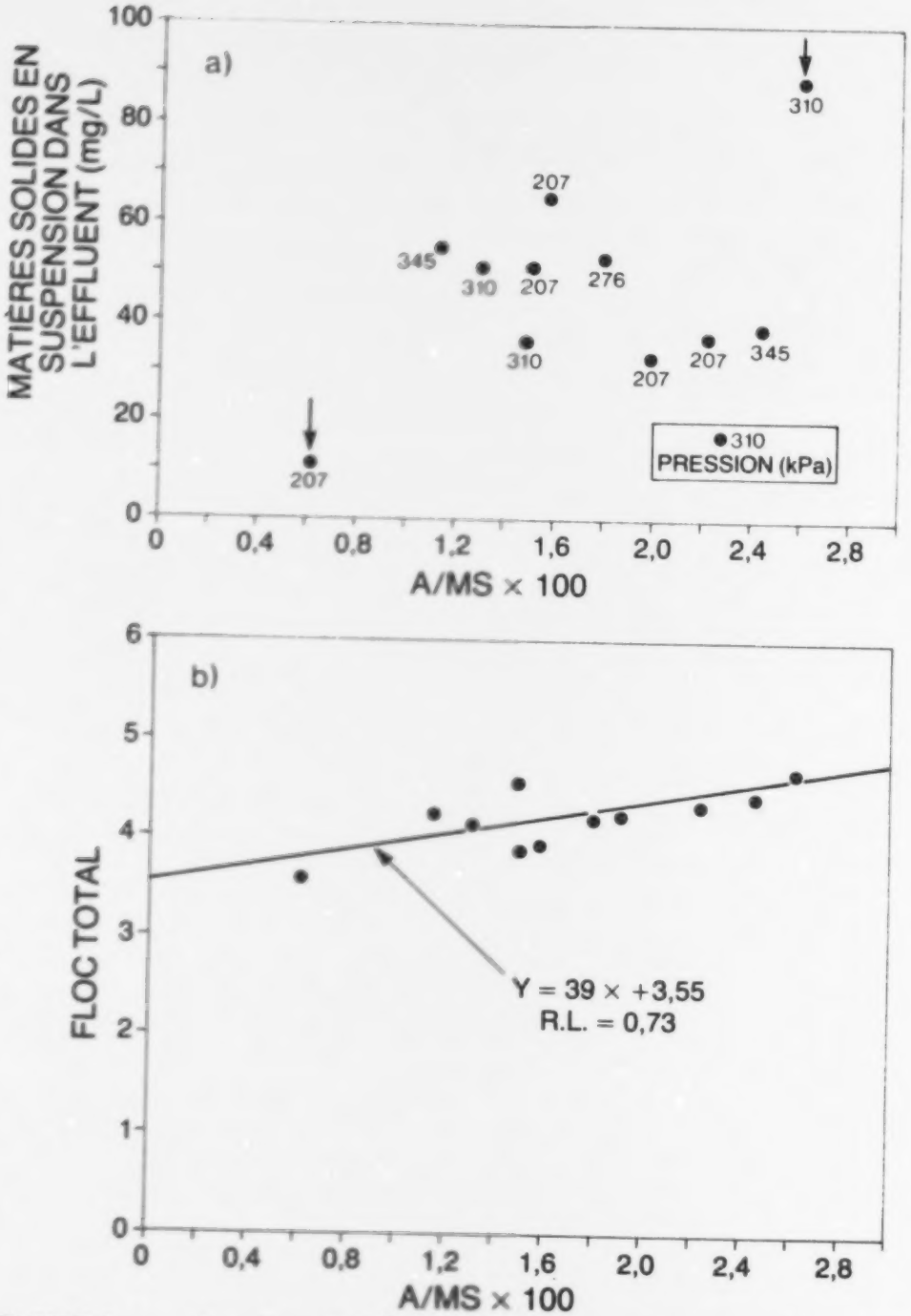


FIGURE 5 FLOC ET MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, SANS POLYMÈRE, DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE I

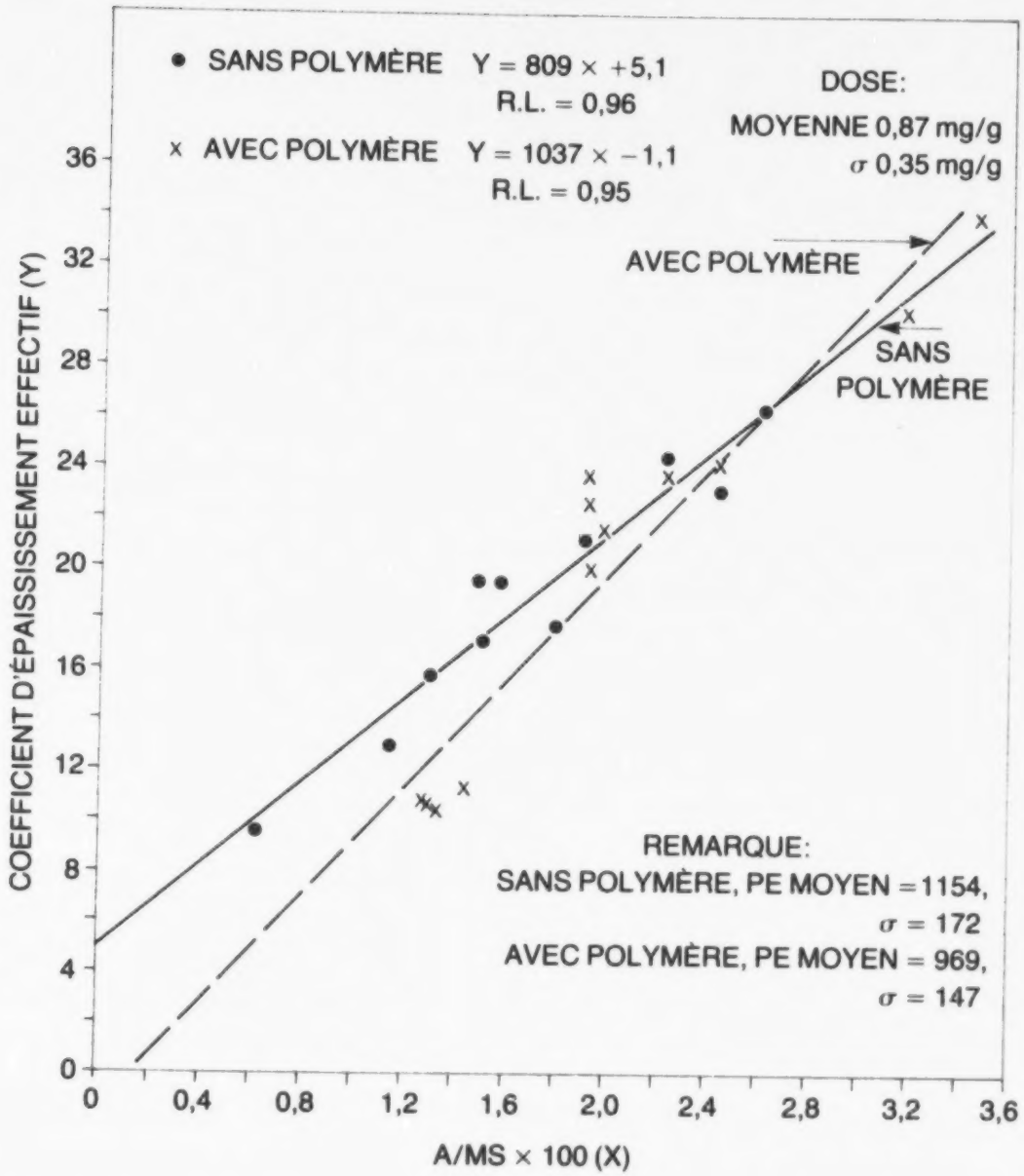


FIGURE 6 COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1

a) Aucune tendance distincte n'est apparue dans le cas des matières solides dans l'effluent par rapport au A/MS (Figure 5a).

b) Les matières solides flottantes par rapport au A/MS (Figure 5b, le graphique traditionnel utilisé pour faire une évaluation de la flottation) donne une corrélation linéaire assez bonne (0,73). La pente douce indique que la variation dans le rapport A/MS a un effet relativement faible sur les matières solides flottantes. On obtient un meilleur diagramme (corrélation linéaire de 0,96) pour le coefficient d'épaississement effectif (coefficient EE) par rapport au A/MS, où le coefficient d'épaississement effectif est le rapport floc/concentrations effectives de matières solides dans l'affluent (figure 6). La pente de ce graphique (809) serait équivalente au paramètre d'épaississement (PE), où PE = coefficient d'épaississement effectif/(A/MS) (Gehr et Henry, 1976) si la ligne passait par l'origine. Cependant, statistiquement parlant, on peut démontrer que le seuil de confiance de cette égalité se situe en-deçà de 95 pour cent. Par conséquent, dans ce cas-ci d'épaississement par flottation, le comportement serait inadéquatement caractérisé par le paramètre d'épaississement (en fait, sa valeur varie entre 943 et 1552, avec une moyenne de 1154). La façon la plus utile de caractériser le comportement serait à l'aide d'un graphique représentant le coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS, ou une équation d'épaississement. L'application du paramètre d'épaississement et de l'équation d'épaississement est décrite en détails dans l'annexe E.

c) La variation de la pression n'a pas d'effet uniforme sur la concentration de floc ou de matières solides dans l'effluent.

d) Les essais de flottation en fonctionnement discontinu n'ont donné aucune indication claire quant au rapport A/MS optimal, mais avec une valeur d'environ 0,02, les valeurs du floc et des matières solides dans l'effluent étaient proches de leurs valeurs les plus élevées et les plus basses, respectivement. Cette valeur a été choisie pour effectuer d'autres tests en discontinu.

5.2.2 Choix du polymère. Le programme de tests idéal pour choisir un polymère serait des séries de tests effectués avec différentes doses de chaque polymère, suivies d'une analyse des coûts basée sur la dose optimale de chaque série. Il est impossible d'appliquer ce programme à cause des contraintes de temps, et le Percol 757 a finalement été choisi pour cette étude parce que:

a) il produit le floc le plus épais;

b) il donne des concentrations de matières solides dans l'effluent aussi basses que tout autre polymère; et

c) il existait sous forme de perles microscopiques se mélangeant facilement à la solution.

Le prix unitaire de Percol 757, un polymère à haute teneur organique, n'était pas le plus bas parmi ceux mis à l'essai (le Percol 728, utilisé pour la phase 3, était le moins cher), mais avait l'avantage d'afficher un rendement élevé, son coût devenant donc secondaire. Il est à remarquer que le Percol 757 n'est pas recommandé pour réaliser l'épaississement général par flottation; il s'est avéré efficace dans les conditions expérimentales utilisées.

5.2.3 Dose optimale du polymère. Les douze tests n'ont montré aucune tendance marquée. L'incapacité à pouvoir maintenir un rapport A/MS constant peut en avoir été la cause, lequel rapport aurait pu affecter la concentration de floc. L'addition du polymère a entraîné une baisse générale dans la concentration de matières solides dans l'effluent (passant de 47 mg/L en moyenne à 14 mg/L), mais on n'a pas pu établir une corrélation entre la variation réelle et le dosage en polymère. Dans ce cas, il a été impossible de mesurer avec assez de précision les niveaux de concentration bas de matières solides. La figure 7 indique que l'addition de 0,7 - 0,9 mg/g du polymère a permis d'obtenir le meilleur effluent et des quantités comprises dans ces limites ont été choisies pour les tests pilotes.

Bien que, d'après la figure 7b, l'addition du polymère n'offrirait aucun avantage en termes de concentration de floc (ceci concorde avec les résultats antécédents obtenus par Gehr et Henry en 1978), la nature du processus a changé. Ceci se voit dans la figure 6 par la pente du coefficient d'épaississement effectif par rapport à la courbe du A/MS. On peut considérer que la pente du PE (1037) et le PE (969) sont égaux à un seuil de signification de cinq pour cent, faisant contraste avec le résultat de la comparaison de ces valeurs sans addition du polymère. On peut interpréter ces résultats en disant que le comportement est plus stable lorsqu'un polymère est utilisé et qu'ils peuvent être caractérisés plus clairement à l'aide de paramètres théoriques, en l'occurrence le paramètre d'épaississement.

5.2.4 Effets des agents de déphosphoration (conjointement avec le polymère choisi) sur les essais de flottation en fonctionnement discontinu. Les résultats de ces essais, tous effectués à une pression de 276 kPa et avec un effluent ayant subi une aération prolongée comme liquide recirculé sont indiqués dans le tableau 12.

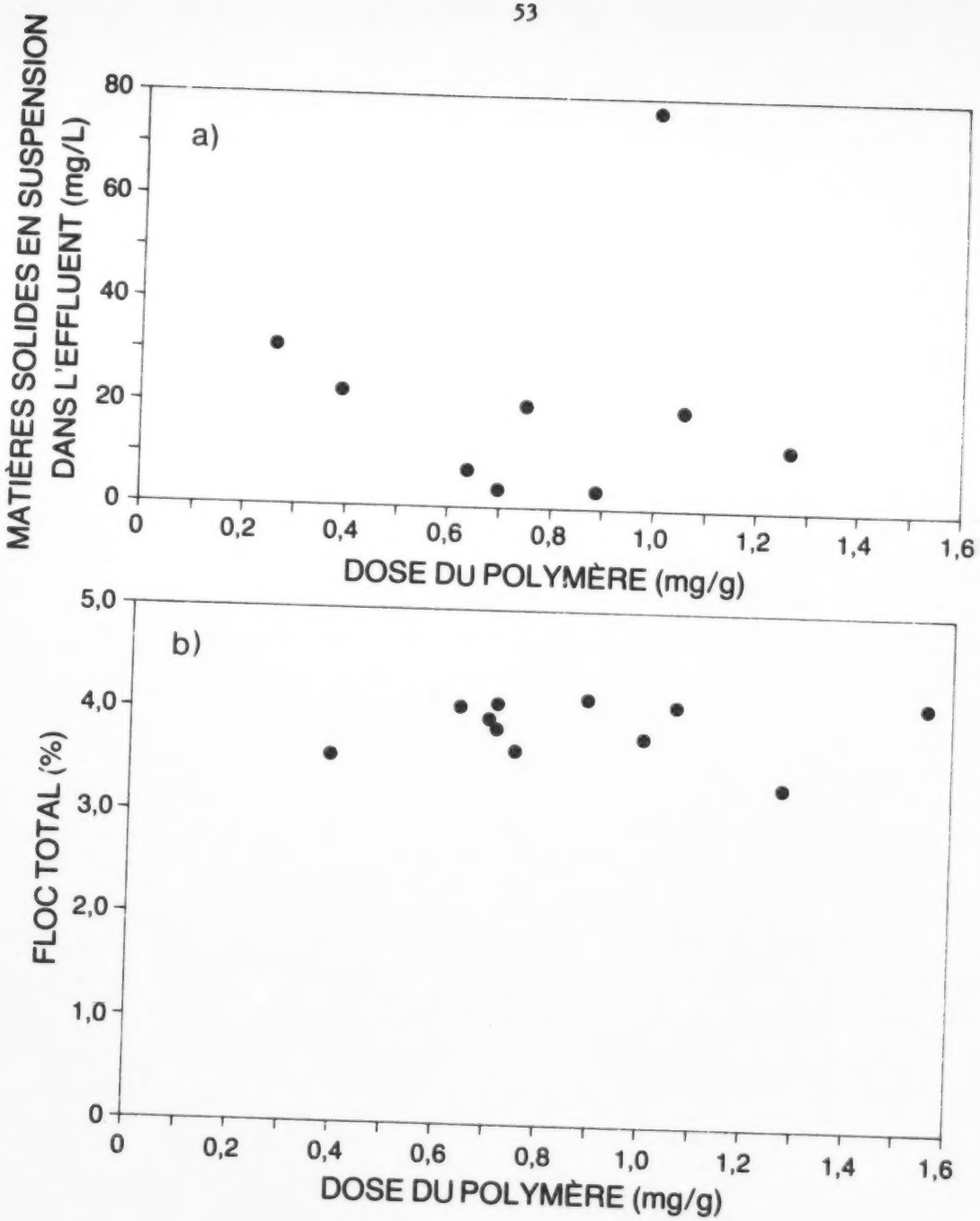


FIGURE 7 EFFET DU POLYMÈRE AJOUTÉ SUR LE FLOC ET LES MATIÈRES SOLIDES DANS L'EFFLUENT, DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1

TABLE 12 EFFETS DU PRODUIT CHIMIQUE AJOUTÉ SUR LA FLOTTATION EFFECTUÉE AVEC UN POLYMÈRE. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1

Test	Produit chimique	Dose (mg/L)	Dose du polymère (mg/g)	A/MS x 100	Matières solides en suspension dans l'afluent (mg/L)	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	FLOC TOTAL (%)	Réduction du phosphore soluble, selon la masse (%)
1	Alun	150	0,98	1,32	6471	24	3,74	63
2	$FeCl_3$	60	0,98	1,41	6471	34	3,52	65
3	Chaux	120	0,78	1,26	6471	49	3,44	-87
4	Alun	150	0,83	1,95	4008	42	3,89	49
5	$FeCl_3$	60	0,83	2,01	4008	27	3,53	58
6	Chaux	120	0,83	2,10	4008	97	3,92	-48
7	Alun	75	1,25	1,55	4404	20	3,82	65
8	$FeCl_3$	30	1,25	1,49	4404	23	3,80	53
9	Chaux	60	1,25	1,54	4404	109	3,93	-13
10	Alun	75	0,71	1,58	4693	32	3,71	33
11	$FeCl_3$	30	0,71	1,31	4693	27	4,01	7,5
12	Chaux	60	0,71	1,38	4693	49	4,13	-11

On voit immédiatement qu'il y a anomalie, c'est-à-dire que l'addition de la chaux semble avoir entraîné un échappement de phosphore soluble. Il est clair que cet effet rendrait la chaux inappropriée aux fins d'utilisation avec la flottation si cela était vrai. On n'a rien trouvé pour expliquer ce résultat et cet effet n'a pas fait l'objet d'autres études car la chaux n'a pas été utilisée pour d'autres raisons. À partir du tableau 12, on peut tirer les conclusions suivantes:

a) La concentration élevée de matières solides dans l'effluent durant les trois premiers tests n'a eu aucun effet sur les résultats, probablement parce que le rapport A/MS et la dose du polymère, en termes de masse, ont été gardés uniformes par rapport aux autres tests.

b) La qualité de l'effluent, dans le cas de l'addition de la chaux, était pire que celle obtenue avec les deux autres produits chimiques.

c) Les agents de déphosphoration n'ont eu aucun effet marquant sur la concentration de matières solides flottantes (figure 7b).

d) Des doses élevées de produits chimiques n'ont ni un effet positif ni un effet négatif sur la concentration de matières solides dans l'effluent, mais, comme prévu, une dose plus élevée de produit chimique entraîne la réduction d'un grand pourcentage du phosphore soluble, sauf dans le cas de la seule exception (inexplicable) du test No. 7.

D'après ces tests, l'alun et le $FeCl_3$, sont presque aussi efficaces l'un que l'autre en termes de déphosphoration, mais le comportement global de la flottation est meilleur lorsque le $FeCl_3$ est utilisé.

Avec un rapport 2,5:1, les résultats sur l'élimination du phosphore dans le cas de l'alun et du $FeCl_3$ sont les mêmes. Ceci confirme les résultats des essais de floculation (section 5.1).

5.2.5 Effets du $FeCl_3$ sur la flottation en fonctionnement discontinu, sans polymère. Le chlorure ferrique n'a aucun effet marquant sur la concentration du floc, mais la concentration des matières solides dans l'effluent s'est accrue marginalement (33%) au fur et à mesure que la dose augmentait. Cependant, cette augmentation est faible comparativement à la variété de doses de $FeCl_3$, c'est-à-dire 300 pour cent. Lorsqu'on compare ceci à la qualité de l'effluent obtenu dans les trois séries de tests précédents, on remarque que l'effluent obtenu dans ce groupe de tests effectués avec du $FeCl_3$ sans polymère avait une concentration de matières solides semblable à celle obtenu dans le groupe de la section 5.2.1, c'est-à-dire pas d'augmentation. Ainsi, l'addition de $FeCl_3$ n'a

pas amélioré la qualité de l'effluent, bien que cette amélioration aurait pu se réaliser à partir d'expériences sur la clarification par gravité dans le domaine du traitement des eaux (voir tableau 13).

TABLEAU 13 EFFET DU $FeCl_3$ SUR LA FLOTTATION RÉALISÉE SANS POLYMÈRE. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1

Essai	Dose du produit chimique (mg/L)	A/MS x 100	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	FLOC TOTAL (%)	Réduction du phosphore soluble, d'après la masse (%)
1	15	1,96	4032	40	4,06	Non concluant
2	30	1,86	4032	45	4,26	Non concluant
3	60	2,02	4032	53	4,19	Non concluant

Malheureusement, les mesures de la quantité de phosphore contenue dans les matières solides de l'affluent n'ont pas été bien faites, et les résultats portant sur la réduction du phosphore n'ont pas été concluants.

À partir des tests en discontinu, on en est arrivé à la conclusion que le $FeCl_3$ était l'agent de déphosphoration le plus approprié à utiliser avec la flottation. À une dose raisonnable (60 mg/L), le $FeCl_3$ ne devrait pas affecter le comportement de la flottation.

5.3 Exploitation de l'usine pilote

Comme on pouvait s'y attendre, la plupart des problèmes au niveau de l'exploitation du système de flottation sous pression se sont posés durant la phase 1. L'équipement n'avait pas été utilisé de façon continue auparavant. Les problèmes présentés en détails ci-dessous devraient être propres à un dispositif de flottation sous pression à l'échelle, et les solutions qui s'y appliquent devraient aussi être applicables à des unités de plus grandes capacités utilisées dans ce domaine.

Le principal problème qui s'est posé au niveau de l'exploitation du dispositif de flottation sous pression était le système de dissolution d'air. Entre la sortie du bassin de flottation et le point où le liquide recirculé, chargé d'air, entre dans le bassin de nouveau,

trois endroits-problèmes ont été identifiés, le dispositif de contrôle du niveau dans le réservoir sous pression, l'éducteur, le système de réaération et la soupape de contrôle du liquide recirculé.

On avait prévu qu'une des causes de problèmes dans le système de dissolution d'air de ce genre serait les cheveux et la poussière contenus dans l'affluent et que le tamis pourrait servir à éliminer ces intrus. Cependant, il s'est avéré impossible de placer le tamis dans le tuyau du liquide recirculé; placé devant le bassin sous pression, il se bouchait rapidement lorsque la qualité du liquide recirculé diminuait, même momentanément. Cependant, on a retenu la chambre crépinée, laquelle éliminerait une certaine partie des matières solides. Pour remédier à ce problème, il faudrait procéder à un tamisage ou à une décantation préalable.

Les autres problèmes d'exploitation de l'unité qui se sont posés durant cette phase concernaient le système d'alimentation du polymère, les mesures de l'oxygène dissous, l'écumage et les accumulations de boues dans divers endroits du bassin de flottation et sur l'équipement mécanique connexe.

5.3.1 Système de contrôle du niveau. Le système de dissolution d'air de Komline-Sanderson repose sur un niveau d'eau fixe maintenu dans le bassin sous pression. Ce niveau est surveillé à l'aide d'un regard de verre, visuellement et à l'aide d'un petit tube de sondage flexible dont l'une des extrémités est placée au niveau voulu et l'autre reliée à distance à un indicateur de niveau de liquide. Lorsque l'eau submerge l'extrémité du tube, le liquide atteint la sonde qui en retour actionne une soupape à solénoide qui envoie de l'air, sous une pression légèrement supérieure à celle dans le bassin, dans le tube, vers le regard de verre; ensuite l'air retourne au bassin. Lorsque le niveau d'eau a été corrigé, la soupape à solénoide se referme.

Ce système de contrôle du niveau a posé beaucoup de problèmes. Le réglage de la différence de pression entre le bassin et le canal d'alimentation d'air pulsé est important, comme l'est le réglage du débit d'air. Les impuretés et la mousse contenues dans le liquide recirculé ont eu tendance à boucher le regard de verre, le tube et la soupape à solénoide et à affecter le fonctionnement de l'indicateur du niveau du liquide. Il n'existe aucune disposition à prendre pour corriger le niveau d'eau dans le bassin. À cause de cela, le niveau d'eau dans le bassin n'est pas souvent au niveau désiré. Le fonctionnement de l'injecteur se trouve affecté (voir ci-dessous) et le processus de flottation peut être un échec total. Comme aucun dispositif mécanique ne pouvait régler

ces problèmes, il a fallu maintenir une attention vigilante pour que le dispositif puisse fonctionner continuellement.

Il existe deux autres types de systèmes de contrôle d'air qui peuvent être utilisés de préférence à celui qui a servi durant la présente étude. Le dispositif Komline-Sanderson de 0,093 m^2 est doté d'un système à flotteur installé dans une chambre de dérivation à l'extérieur du bassin sous pression. Le flotteur est relié par un dispositif mécanique à un interrupteur au mercure qui actionne une soupape à solénoïde lorsque le niveau d'eau est trop élevé. Lorsque cette soupape est actionnée, un courant d'air entre directement dans le bassin et abaisse le niveau du liquide.

L'autre dispositif consiste en deux électrodes placées dans le bassin sous pression, lesquelles contrôlent le niveau et commandent l'alimentation d'air auxiliaire (Davis, 1977). Cette méthode semble être la plus simple et celle à utiliser de préférence, en particulier pour les petits dispositifs où le temps de réaction est important.

Il semble cependant que le système de contrôle du niveau de l'eau qui a servi dans cette étude est utilisé avec succès dans les installations à l'échelle dans les usines d'épuration des eaux d'égouts en Ontario. Le temps de réaction dans les dispositifs de plus grandes capacités est beaucoup plus long que dans les usines à l'échelle et, pour cette raison, le système de contrôle du niveau de l'eau s'avère adéquat. Néanmoins, lorsqu'on peut choisir une méthode de rechange, l'une des deux mentionnées ci-dessus semble préférable.

5.3.2 Éjecteur et système de réaération. Afin d'obtenir des niveaux adéquats de saturation d'air, on utilise un système de réaération. Le liquide est pompé de la base du bassin sous pression et retourné par un ou plusieurs éjecteurs. La turbulence ainsi créée et l'air poussé dans le liquide par le mécanisme des éjecteurs permettent à une plus grande quantité d'air d'être poussée dans le liquide.

Un seul éjecteur a été utilisé avec le dispositif durant cette étude. La principale partie de cet éjecteur est un gicleur de 8 mm par lequel le liquide passe. Les possibilités de bouchons sont élevées et, une fois que cela se produit, le niveau de saturation d'air diminue, le bassin sous pression doit être ouvert et l'éjecteur doit être enlevé et nettoyé.

Il a été conseillé d'appliquer une méthode simple de nettoyage de l'éjecteur durant l'exploitation de l'usine, laquelle méthode ne nécessite que des changements mineurs aux tuyaux. La configuration de la tuyauterie et la méthode de nettoyage sont présentées à la figure 8.

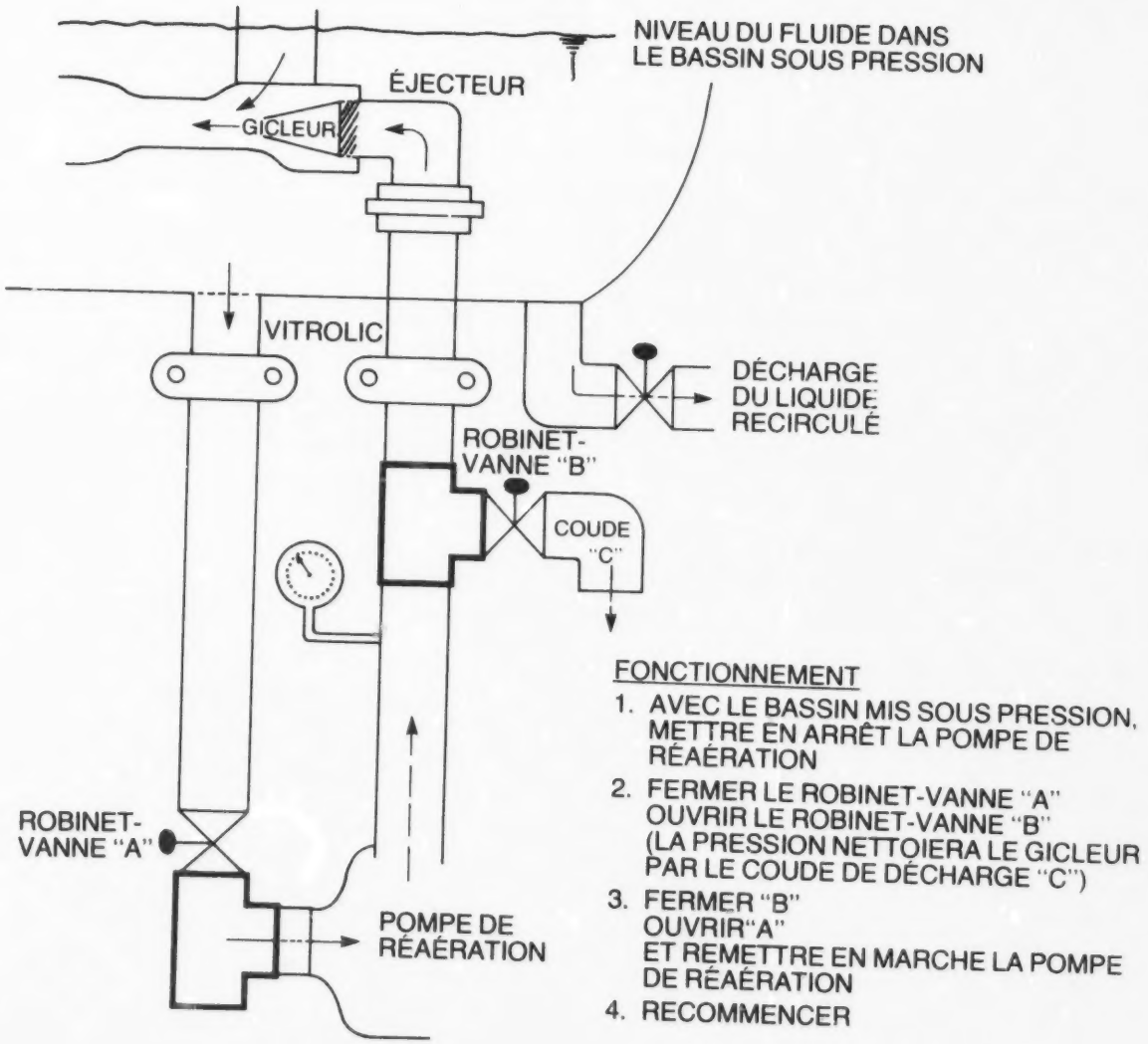


FIGURE 8 ADAPTATION DES SOUPAPES POUR LE NETTOYAGE DE L'ÉJECTEUR, USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION

5.3.3 Soupape de contrôle du liquide recirculé. Le problème des cheveux, de la poussière et d'autres détritus s'est encore posé au niveau de la soupape de contrôle du liquide recirculé. Afin de maintenir une alimentation constante en air aux fins de flottation, il a été nécessaire de garder un débit de recirculation constant. Après nombre de changements, on s'est aperçu qu'on pouvait éviter les bouchons et maintenir un débit constant en utilisant une soupape à diaphragme. Une soupape à diaphragme de 19 mm de diamètre s'est avérée plus efficace que celle de plus grandes dimensions lorsqu'elle était lavée régulièrement et que les bouchons et les perturbations au niveau du débit étaient minimisés. La petite ouverture avait l'avantage d'entraîner une perte de charge assez élevée pour assurer qu'un débit de recirculation suffisant passe par la membrane de l'indicateur d'oxygène dissous placé dans le tuyau contournant la soupape de contrôle. Cependant, le débit du liquide recirculé était ainsi limité à 173 L/min.

5.3.4 Addition du polymère. Du polymère sous forme de perles microscopiques a été mélangé en solution concentrée de 0,1% et introduit dans le tuyau de recirculation. Selon le fabricant, Allied Colloids, cette concentration particulière est la plus faible qui puisse être entreposée durant une période prolongée (c'est-à-dire 24 heures) et la plus forte qui puisse être ajoutée directement au système de flottation sous pression. Il a été nécessaire, par conséquent, de préparer ce polymère chaque jour.

Une méthode préférable et qui est appliquée généralement dans les installations à l'échelle, est de préparer une solution du polymère à concentration plus élevée, disons un pour cent, et d'y incorporer de l'eau en effectuant un mélange dans le tuyau. De cette façon, le polymère peut être conservé sous forme liquide durant des périodes plus longues, ce qui évite de le préparer chaque jour. Il n'a pas été possible d'appliquer cette méthode pour le dispositif à l'échelle pilote.

5.3.5 Mesures de l'oxygène dissous. La quantité d'air disponible pour la flottation a été mesurée à partir des quantités d'oxygène dissous mesurées à l'aide d'une sonde placée dans un tuyau contournant la soupape de contrôle. On espérait que des relevés de l'oxygène dissous auraient pu être faits de façon continuelle, mais la membrane en Teflon fragile de la sonde se brisait trop facilement à cause des impuretés contenues dans le liquide recirculé. De plus, on s'est aperçu que les relevés diminuaient lorsque la sonde était soumise à une combinaison d'un débit élevé (jusqu'à 50 L/min) et d'une pression élevée (jusqu'à 138 kPa), durant des périodes supérieures à 1/2 heure environ. Il a été facile et possible d'obtenir périodiquement une valeur pour la masse d'air disponible, mais

l'équipement devait être manipulé avec soins et la sonde devait être nettoyée et rechargée régulièrement.

5.3.6 Fonctionnement de l'écumoire. L'écumoire est doté d'une transmission à vitesse fixe, mais son fonctionnement peut être contrôlé à l'aide d'une minuterie automatique. Cette technique de contrôle de la vitesse d'élimination du floc s'est avérée adéquate dans ce cas, mais une transmission à vitesse variable offrirait une souplesse supplémentaire.

L'écumoire fonctionnait adéquatement lorsque la tension de la chaîne était correcte et que cette dernière était lubrifiée régulièrement. De plus, les lames de l'écumoire devaient être ajustées afin de réduire le courant de fond entre les lames et la plage métallique. Il a été nécessaire d'élever la plage métallique en ajoutant une feuille de chlorure de polyvinyle de 6 mm d'épaisseur, car il était impossible de placer les lames de l'écumoire assez proche de la surface originale de la plage.

5.3.7 Curage des bassins. Il se forme des accumulations de boue lorsque la direction du mouvement des lames de l'écumoire change et aussi à certains points précis où l'écumoire passe. Le curage des bassins fait partie de l'entretien régulier.

5.4 Résultats des tests à l'usine pilote

5.4.1 Commentaires généraux. Les résultats des tests effectués à l'usine pilote durant la phase 1 sont présentés dans le tableau 14. Comme on l'a mentionné à la section 4.3.2, un nombre limité de tests ont été effectués. De plus, comme ces expériences sont les premières à avoir été faites dans cette étude, un nombre de problèmes au niveau de la technique expérimentale n'ont été résolus qu'au fur et à mesure de la progression de l'étude, et la qualité des données n'est pas aussi bonne que celle obtenue durant les autres phases.

Il y a beaucoup de variations au niveau du rapport de recirculation. Ces variations étaient en partie intentionnelles, mais elles étaient aussi causées en partie par l'apparition de bouchons au niveau de la soupape de contrôle du liquide recirculé; celle-ci a été remplacée durant les tests de la façon décrite dans la section 5.3.3

Dans de nombreux cas, le pourcentage de saturation d'air est établi à 60 pour cent. C'est une valeur hypothétique (basée sur l'expérience) qui a été estimée lorsque des problèmes se sont posés au niveau de l'indicateur d'oxygène dissous.

TABLEAU 14 RÉSULTATS SUR LE FONCTIONNEMENT. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE I

Test	Dose du polymère (mg/g)	Dose de $FeCl_3$ (mg/g)	Rapport de recirculation	Saturation d'air (%)	A/MS x 100	Affluent			Effluent				
						Débit (L/min)	Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)	Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)	Floc total (%)	PE	Réduction du phosphore soluble (%)
1	1,01	0	2,5	68	3,81	32	4071	1,3	5	0,8	3,77	857	54
2	0,88	0	2,4	67	3,22	32	4651	1,1	8	-	4,00	915	36
3	0,93	0	2,6	63	3,22	32	4387	1,3	4	1,1	3,80	963	54
4	0,90	0	2,6	60	2,90	32	4552	1,7	12	-	3,75	1035	nég.
5	1,13	0	2,3	60	2,54	32	4495	1,8	2	1,9	3,91	1111	nég.
6	0,89	0	3,1	60	3,34	32	4605	1,8	14	2,1	4,25	1146	nég.
7	0,93	0	2,1	60	2,58	32	4385	1,3	4	-	3,89	1427	nég.
8	0,91	0	0,9	60	1,02	32	4476	-	10	2,1	2,55	1040	56
9	0,89	0	3,4	46	2,75	32	4572	1,7	8	2,2	4,07	1432	nég.
10	0,84	0	4,2	32	3,19	32	4785	1,9	5	-	4,03	1362	nég.
11	0,91	0	2,5	62	2,94	32	4508	1,1	10	2,9	3,39	895	nég.
12	0,89	0	2,4	60	2,65	32	4382	1,7	3	1,2	3,89	1096	6
13	0,84	15	2,5	64	2,89	32	4872	1,6	11	0,4	3,73	926	75
14	0,83	15	2,1	65	2,49	32	4904	1,6	17	0,2	3,26	840	87,50
15	0.84	30	2,3	61	2,42	32	4880	1,6	6	0.6	3,65	1018	62,5
16	0.90	30	1,2	51	1,42	32	4553	1,6	5	1,1	1,83	626	31
17	0,86	45	2,5	63	3,00	32	4730	1,6	10	1,6	4,16	1027	0
18	0,87	60	2,5	60	2,60	32	4716	1,6	4	1,2	3,64	1038	25
19	0,91	60	2,5	60	2,91	32	4497	1,6	8	0,7	3,65	977	56
20	0,87	60	2,4	60	2,78	32	4679	1,6	4	0,4	3,43	907	75
21	0,42	60	1,6	60	1,94	32	4497	1,6	5	0,6	2,77	818	62,5
22	0,53	60	1,8	49	1,20	55	5572	1,6	5	1,0	3,51	1444	37,5

À l'aide d'un échantillonneur automatique, des échantillons de l'affluent ont été prélevés dans le bassin de mélange rapide. La valeur obtenue pour le phosphore soluble contenu dans l'affluent était de toute évidence affectée par l'addition de $FeCl_3$, laquelle se faisait avant le passage du liquide dans le bassin de mélange rapide. Par conséquent, une valeur moyenne de 1,6 mg/L, calculée à partir des tests effectués sans $FeCl_3$, a été utilisée à titre d'indication de phosphore soluble contenu dans l'affluent.

5.4.2 Variation du rapport A/MS. La figure 9 montre la variation de la concentration de floc avec le rapport A/MS. Il n'y a qu'un repère représentant les valeurs A/MS inférieures à 0,24 lorsqu'il n'y a pas de polymère, et à ce point, la concentration de floc montre une baisse évidente. Au-dessus de la valeur de 0,024 cependant, il y a peu de changements dans la concentration de floc au fur et à mesure que le A/MS augmente.

Une valeur conservatrice de fonctionnement de 0,028 pour le rapport A/MS devrait assurer un rendement adéquat.

Il n'y a aucune présentation du graphique de la concentration de matières solides dans l'effluent par rapport au A/MS, car la précision des mesures à des niveaux si bas (moyenne de 6 mg/L) est discutable.

Lorsque les valeurs du coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS sont reportées sur un graphique (figure 10), on obtient seulement une corrélation linéaire passable (0,76) et la pente de 919 est très différente du paramètre d'épaississement moyen de 1106. Cette dispersion des résultats semble être causée par les erreurs expérimentales.

5.4.3 Addition du produit chimique. D'après les résultats présentés aux figures 9 et 10, il est évident que l'addition du produit chimique a peu d'effets sur le comportement. La dipersion réduite est attribuée à la technique expérimentale améliorée, plutôt qu'au comportement plus stable. Dans ce cas, la pente du graphique représentant le coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS est, du point de vue statistiques, égale au paramètre d'épaississement à un seuil de confiance de cinq pour cent (pente = 973; PE 962).

5.4.4 Comparaison du comportement avec et sans $FeCl_3$. Le tableau 15 montre que l'addition de $FeCl_3$ a peu d'effets sur la flottation de la liqueur mixte provenant de l'usine d'épuration par aération prolongée.

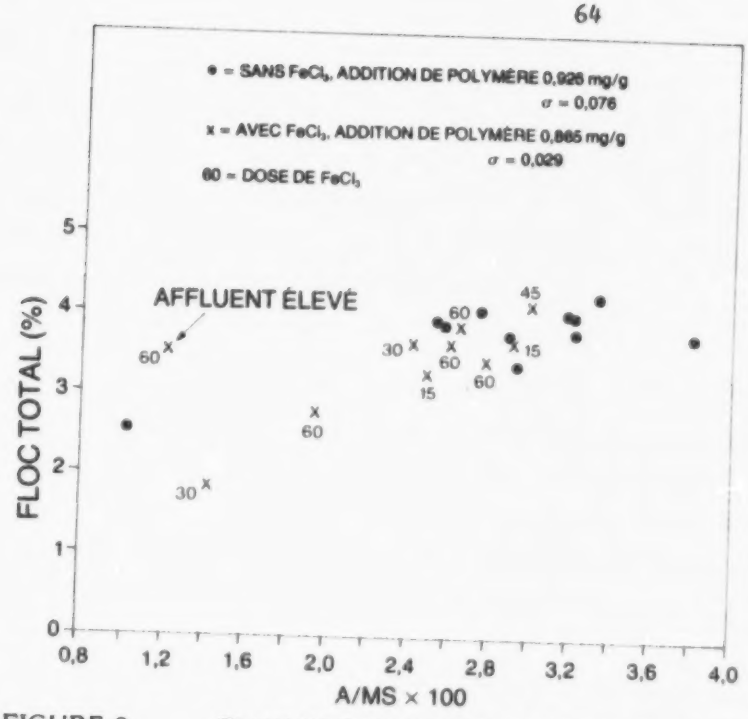


FIGURE 9 FLOC PAR RAPPORT AU A/MS, DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 1

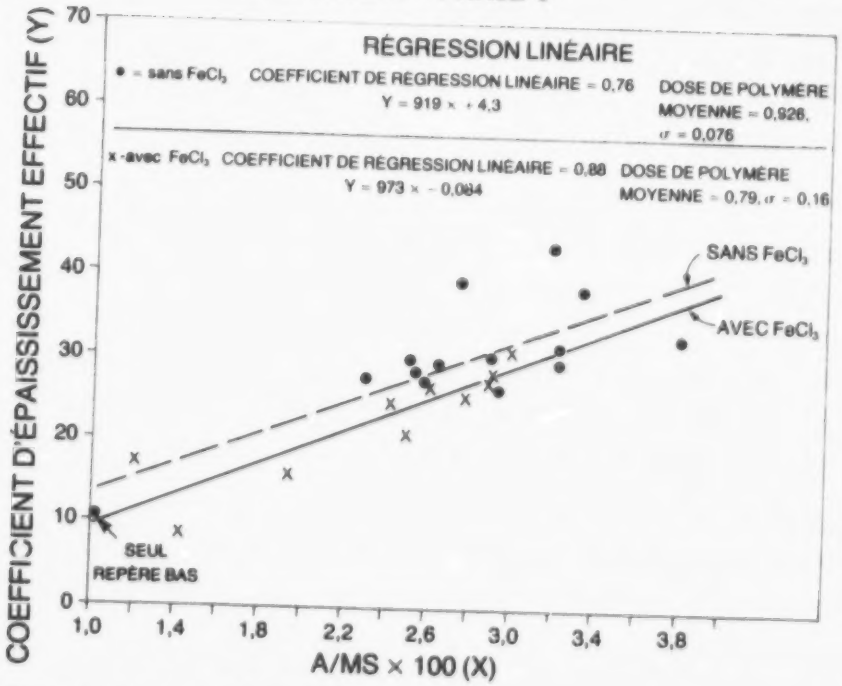


FIGURE 10 COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC TOUS LES REPÈRES. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 1

TABLEAU 15 COMPORTEMENT DE LA FLOTTATION, AVEC OU SANS $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE I

	Concentration moyenne de floc total (%)	Concentration moyenne de matières solides en suspension dans l'effluent (%)	PE moyen
Sans $FeCl_3$	3,9	6	1106
Avec du $FeCl_3$	3,6	8	962

5.4.5 Extrêmes. Deux tests (12 et 22) ont intentionnellement été effectués en utilisant des valeurs "extrêmes"; le premier avec une dose du polymère faible, le deuxième avec une dose du polymère faible, un rapport A/MS bas et une charge hydraulique et des matières solides élevées. Aucune détérioration n'est apparue au niveau du comportement. La concentration de matières solides en suspension dans l'effluent était inférieure à la moyenne pour tous les autres tests antérieurs. Bien que la concentration de floc total ait diminué dans le test 21, elle a augmenté de nouveau dans le test 22, ce qui est probablement dû au voile de boues suspendues plus épais. Dans le deuxième cas cependant, le débit élevé a été maintenu durant seulement quatre heures et, bien qu'à la fin de cette période le comportement ne s'était pas détérioré, on ne peut pas assumer que ce débit élevé pourrait être supporté sur une base permanente. Le tableau 16 ci-dessous montre la moyenne, les conditions d'exploitation extrêmes, les résultats des tests et les niveaux de fonctionnement recommandés par le fabricant.

Aucun essai spécifique n'a été effectué pour déterminer si le dispositif de flottation sous pression pourrait fonctionner sans polymère. Au cours des expériences, on a suspendu pendant un court moment et par inadvertance l'addition du polymère et la qualité de l'effluent s'est détériorée de façon marquée.

5.4.6 Résumé des valeurs afférentes au fonctionnement et résultats des tests. Une fois de plus, les valeurs moyennes afférentes au fonctionnement données dans le tableau 17 ont été obtenues à partir d'un nombre relativement petit de tests soumis à une variété de conditions limitée. On peut considérer les paramètres de charge comme des valeurs conservatrices. Selon les indications, l'usine pouvait être soumise à des charges jusqu'à deux fois supérieures à celles suggérées, sans que le comportement ne se détériore.

TABLEAU 16 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT RECOMMANDÉES, MOYENNES ET EXTRÊMES ET RÉSULTATS DES TESTS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE I

	Dose du polymère (mg/g)	Saturation d'air (%)	A/MS x 100	Débit de l'affluent (L/min)	Matières solides en suspension (mg/L)	Charge hydraulique (m/h)	Charges de matières solides ($kg/m^2 \cdot h$)
Recommandation du fabricant	-	75-95	-	-	-	1,95	9,8
Moyenne, test 1-20	0,90	60	2,73	32	4600	2,27	10,4
Test 21	0,42	60	1,94	32	4500	2,27	10,3
Test 22	0,53	49	1,20	55	5572	3,90	21,8

TABLEAU 17 FLOTTATION DE LA LIQUEUR MIXTE PROVENANT DE L'USINE D'ÉPURATION À AÉRATION PROLONGÉE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 1

Paramètre	Valeur moyenne
Débit de l'affluent (L/min)	32
Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	4600
Polymère (mg/g)	0,9
$FeCl_3$ (mg/L)	0-60
Air (% de saturation)	60
Rapport A/MS	0,028
Charge hydraulique (m/h)	2,27
Charge de matières solides (kg/m•h)	10,4
Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	< 10
Floc total (%)	3,8
PE	1000

5.5 Mise à l'échelle

Le tableau 18 compare le comportement en fonctionnement discontinu et à l'usine pilote. En général, le comportement était comparable, la seule différence marquée étant la qualité de l'effluent de l'usine pilote qui montrait une amélioration quatre fois supérieure à l'autre.

La qualité des données sur l'usine pilote s'est avérée moins bonne que ce qu'on avait espéré à cause du nombre limité d'expériences et de l'absence, au début, d'une technique expérimentale fiable. Ainsi, on peut laisser de côté les différences qui existent entre les résultats obtenus pour le dispositif en fonctionnement discontinu et ceux pour l'usine pilote (par exemple, les matières solides flottantes avec l'addition du polymère et du $FeCl_3$ à un pourcentage de 4 et 3,6 pour cent respectivement). La comparaison entre la pente de l'équation d'épaississement et le PE pour les deux dispositifs, et la variation de ces paramètres lorsqu'il y a présence ou non de $FeCl_3$, n'est pas entièrement compréhensible. Cependant, les différences globales étaient si petites qu'une fois qu'une valeur générale de 1 000 pour le PE a été établie (par les études sur le dispositif en fonctionnement discontinu et l'usine pilote) pour un déchet particulier, elle a pu être

TABLEAU 18 COMPARAISON DU COMPORTEMENT AVEC LE DISPOSITIF EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU ET À L'USINE PILOTE - PHASE I

		Flottation sous pression en fonctionnement discontinu	Usine pilote de flottation sous pression
Pression (kPA)		207-345	Moyenne de 386
Rapport A/MS optimal		0,02 Le A/MS a eu un effet linéaire faible sur le floc	0.028 Au-dessus de 0,024, le rapport A/MS n'a eu aucun effet marqué sur le floc
Dose de polymère (mg/g)		0,7-0,9	Moyenne de 0,93
Floc total (%)	Sans polymère	4,2	
	Seulement le polymère	4,0	3,9
	Polymère et $FeCl_3$	4,0	3,6
Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Sans polymère	47	-
	Seulement le polymère	14	6
	Polymère et $FeCl_3$	35	8
EE*	Sans polymère	y = 809 x +5,1	-
	Seulement le polymère	y = 1037 x -1,1	y = 919 x +4,3
Paramètre d'épaississement moyen	Sans polymère	1154/	-
	Seulement le polymère	969	1106
	Polymère et $FeCl_3$	1107	962
Effet de l'addition de $FeCl_3$		Augmentation des matières solides dans l'effluent	Minime

* Équation d'épaississement

utilisée pour évaluer l'efficacité des différents polymères dans la flottation, ainsi que le dosage requis. Les besoins en air, ainsi que le rapport de recirculation associé, ont aussi pu être déterminés.

En général, les tests effectués en fonctionnement discontinu durant la phase I ont donné une indication fiable sur le rendement de l'usine pilote, sauf dans le cas des matières solides contenues dans l'effluent, où on a obtenu des résultats supérieurs à l'usine pilote. Cependant, comme le dispositif de laboratoire est un système en fonctionnement discontinu, il ne peut donner des valeurs modèles pour les paramètres en fonctionnement continu comme les charges de matières solides et hydrauliques; ces valeurs devront être calculées en se servant d'un système en fonctionnement continu. L'annexe E donne plus de détails sur l'application du paramètre d'épaississement et de l'équation d'épaississement pour l'évaluation du comportement de la flottation sous pression.

5.6 Facteurs économiques afférents à la flottation de la liqueur mixte en aération prolongée

La flottation sous pression de la liqueur mixte (4 600 mg/L) provenant d'un système à aération prolongée a produit un floc contenant une concentration de matières solides d'environ quatre pour cent. En appliquant la technique de la décantation, on obtiendrait une concentration d'un pour cent. Afin de comparer la flottation sous pression à la décantation de façon équitable (c'est-à-dire un épaississement égal), la boue ayant une concentration d'un pour cent et provenant du bassin de décantation doit être plus concentrée. La technique de l'épaississement par flottation est maintenant très utilisée à cette fin et le coût y afférent a été ajouté par conséquent aux coûts de décantation afin de procéder à une comparaison réaliste avec la technique de flottation sous pression.

La taille des dispositifs pour les deux options a été basée sur les charges hydrauliques ou de matières solides principales suivantes:

Option	Charge moyenne	Facteur de charge de pointe
1. Flottation sous pression (liqueur mixte)	2,27 m/h*	1,8
2. Décantation/épaississement		
a) Décantation terminale	0,61 m/h**	2
b) Épaississement par flottation	9,8 kg/m^2***	2

* De l'usine pilote dans l'étape 1.
** Pratique courante, Ministère de l'environnement de l'Ontario.
*** Recommandations des fabricants.

L'annexe K donne une liste détaillée de tous les critères modèles affectant les coûts.

L'estimation des coûts afférents aux options 1 et 2 a été faite pour des usines d'épuration à aération prolongée de capacité de 4 500, 45 500 et 227 000 m^3/j, bien qu'en pratique, il est peu probable que les deux plus grosses utilisent le processus de l'aération prolongée.

Les renseignements tirés des contrats de construction fournis par les ingénieurs consultants et les prix de l'équipement provenant des fabricants ont servi de base aux fins d'estimation des coûts en capital. Les coûts annuels pour l'énergie, la main-d'oeuvre, l'entretien et les produits chimiques sont propres au sud de l'Ontario.

L'annexe K comprend des renseignements sur les estimations des coûts afférents à l'excavation, au béton, à l'installation de l'équipement, etc., de même qu'une ventilation des frais d'exploitation et d'entretien. Le tableau 19 ci-dessous résume la comparaison des coûts afférents à la flottation sous pression et à la décantation pour le système à aération prolongée.

TABLEAU 19 COMPARAISON DES COÛTS: AÉRATION PROLONGÉE

	4 500 m^3/j	45 500 m^3/j	227 000 m^3/j
Coûts en capital			
1. Flottation sous pression (liqueur mixte)	670 000$	5 484 000	22 680 000
2. Décantation/épaississement			
a) Décantation terminale	172 000	1 313 000	5 752 000
b) Épaississement par flottation	121 000	422 000	676 000
	293 000$	1 735 000	6 428 000
Coûts en capital			
1. Flottation sous pression (liqueur mixte)	69 600	587 000	3 310 000
2. Décantation/épaississement			
a) Décantation terminale	5 800	28 000	119 000
b) Épaississement par flottation	4 800	19 100	58 200
	10 600$	47 100	177 200

*Comprend les coûts des polymères

6 RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES ET DISCUSSION - PHASE 2 (EAUX D'ÉGOUTS BRUTES)

6.1 Essais de floculation

Les trois séries de tests effectués avec l'alun, le $FeCl_3$ et la chaux respectivement n'ont pas donné de résultats concluants, et cela à cause de trois facteurs; une grande variation dans la concentration initiale de phosphore (2,6 - 5,6 mg/L pour la quantité de phosphore totale; 1,5 - 3,0 mg/L pour la quantité de phosphore soluble totale); une variation dans le rapport entre la quantité initiale totale de phosphore et la quantité initiale totale de phosphore soluble (1,7 - 2,4); et les résultats analytiques peu précis obtenus avec des valeurs inférieures à 1,0 mg/L. Comme ces essais de floculation étaient secondaires dans cette étude, il n'était pas certain qu'on obtiendrait les mêmes résultats en les répétant, et le $FeCl_3$ a de nouveau été choisi comme agent de déphosphoration. Les raisons de ce choix sont semblables à celles évoquées dans la phase 1, c'est-à-dire qu'il est très utilisé pour éliminer le phosphore et semblait être le plus économique. De plus, il était préférable de maintenir une uniformité entre les phases, tous les autres facteurs étant égaux.

6.2 Essais de flottation en fonctionnement discontinu

Les concentrations de matières solides dans l'affluent d'eaux d'égouts étaient si faibles (autour de 200 mg/L) que le volume de floc obtenu au cours des essais en fonctionnement discontinu était trop faible pour servir d'échantillon représentatif. Ainsi, toutes les conclusions tirées des expériences en fonctionnement discontinu ont été basées sur la qualité de l'effluent.

6.2.1 Détermination du rapport A/MS optimal. L'effet de l'augmentation du rapport A/MS sur les matières solides en suspension dans l'effluent est représenté à la figure 11. Contrairement à l'expérience passée sur la liqueur mixte et les boues activées (Gehr et Henry, 1976), plus le rapport A/MS augmente, plus il y a une nette amélioration de la qualité de l'effluent. Les données sont de formes instable-stable, semblables à celles présentées par Mulbarger et Huffman (1970). La zone stable, où la qualité de l'effluent devient plus uniforme, semble s'étendre d'un A/MS d'environ 0,3 en montant. Dans les derniers tests effectués avec la liqueur mixte et les boues activées, les auteurs n'ont trouvé soit aucune relation entre les matières solides en suspension dans l'effluent et le rapport A/MS ou, à leur grande surprise, que la qualité de l'effluent diminuait au fur et à mesure que le rapport A/MS augmentait.

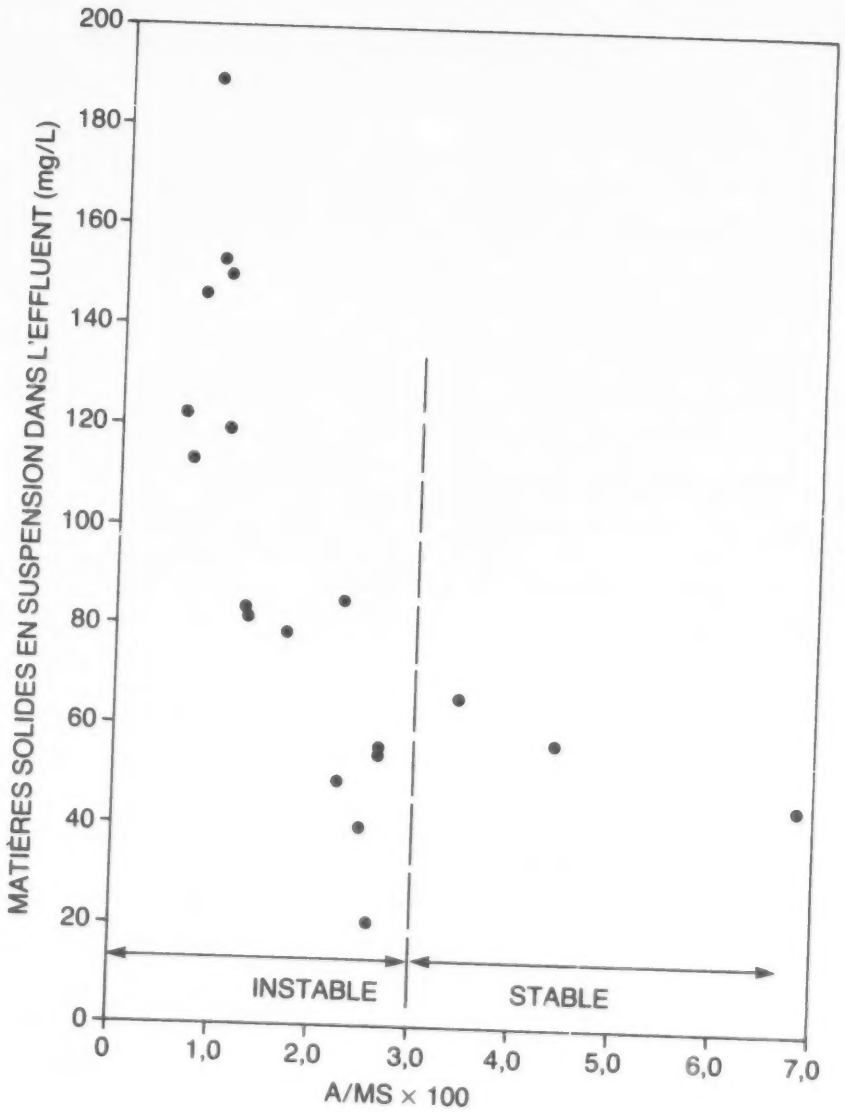


FIGURE 11 MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2

Bien qu'à la suite des tests en fonctionnement discontinu on puisse recommander qu'un rapport A/MS de 0,3 soit utilisé avec l'usine pilote, la grande variation de la concentration de matières solides en suspension dans les eaux d'égouts empêche de maintenir un rapport A/MS constant. Comme but modèle, il faudrait probablement s'assurer que le rapport A/MS ne baisse pas au-dessous de 0,3, même si la concentration des matières solides dans l'affluent est très élevée.

6.2.2 **Choix du polymère.** On n'a pas réussi à établir, à partir des 52 tests effectués sur 17 polymères, quel était, s'il y en avait un, celui qui était le plus approprié. Comme le Percol 757 avait déjà été utilisé antérieurement et faisait partie des polymères acceptables,il a été utilisé pour les tests à l'usine pilote.

6.2.3 **Dose optimale du polymère.** Des tests avec diverses doses ont été effectués avec les polymères offrant un rendement prometteur et, dans de nombreux cas, on s'est aperçu que l'addition d'un polymère ne réduisait pas en fait la concentration de matières solides dans l'effluent. Des tests effectués sur différents échantillons avec le même polymère ont donné des résultats dispersés et, dans certains cas, la concentration la plus basse de matières solides dans l'effluent a été obtenue sans l'addition d'un polymère. Les 13 tests effectués avec le Percol 757 n'ont démontré aucune tendance et il était impossible de dire avec certitude que l'addition du polymère améliorerait le comportement (tableau 20). Par conséquent, il a été impossible de recommander un dosage particulier, ou même une variété de doses, pour les tests à l'usine pilote.

Comme ces tests ont été répartis sur une période prolongée (20 jours séparant les premiers et les derniers essais), la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent a considérablement varié. Le tableau 20 est divisé en deux sections, comprenant des concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent, basse et élevée. Comme le rapport A/MS et la dose du polymère sont inversement proportionnels à la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent, tous les autres facteurs étant égaux, ces quantités étaient proportionnellement plus basses dans la dernière série de tests (tests 10 à 13). Ainsi, la diminution marquée de la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent aurait pu être causée soit par la réduction du rapport A/MS ou de la dose du polymère ou par les deux. Cependant, fait important, ni la captation moyenne des matières solides, ni la réduction moyenne des matières solides ont été affectées, indiquant ainsi que le pourcentage de matières solides éliminées n'a pas vraiment été affecté, soit par le rapport A/MS ou par la dose du polymère.

TABLEAU 20 EFFET DE L'ADDITION DU POLYMÈRE (PERCOL 757). DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2

Test	Dose du polymère (mg/g)	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	A/MS x 100	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Captation des matières solides* (%)	Réduction des matières solides** (%)
1	4,07	231	2,63	46	61	80
2	0,38	183	2,60	69	36	62
3	1,50	183	2,29	45	58	75
4	3,00	183	2,35	13	88	93
5	4,50	183	2,28	62	42	66
6	0,85	161	2,61	43	55	73
7	2,56	161	2,36	43	55	73
8	4,27	161	-	39	59	76
9	6,00	161	2,68	41	57	75
Moyenne	3,01	178	2,47	45	57	75
σ	1,87	92	0,17	16	14	9
10	0,27	552	0,86	146	54	74
11	0,75	552	0,80	142	57	74
12	1,25	552	0,75	131	60	76
13	2,60	369	1,14	112	48	70
Moyenne	1,22	506	0,88	133	55	74
σ	1,00	92	0,17	15	5	3

$$\text{*Captation des matières solides} = \frac{\text{Concentration totale des matières solides en suspension (Affluent + liquide recirculé) - Concentration totale de matières solides en suspension dans l'effluent}}{\text{Liquide recirculé - Concentration totale de matières solides en suspension (Affluent + liquide recirculé)}} \times 100$$

$$\text{**Réduction de matières solides} = \frac{\text{Concentration de matières solides dans l'affluent - Concentration de matières solides dans l'effluent}}{\text{Concentration de matières solides dans l'effluent}} \times 100$$

6.2.4 Comparaison des liquides recirculés. L'objet de ces essais de flottation en fonctionnement discontinu était de déterminer si le choix du liquide recirculé influençait les résultats. Les essais antérieurs effectués sur les boues activées (Gehr et Henry, 1976) avaient démontré que sans l'addition du polymère, les résultats étaient les mêmes malgré l'utilisation de l'eau du robinet ou de l'effluent d'usine d'épuration à boues activées comme liquide recirculé. Cependant, avec le polymère, les matières solides contenues dans l'effluent d'usine d'épuration à boues activées se sont formées en flocons dans le bassin sous pression, diminuant ainsi la quantité du polymère nécessaire à la flottation. Dans un dispositif de flottation sous pression en fonctionnement continu, le polymère est introduit après la mise sous pression, éliminant ainsi la perte du polymère. Pour effectuer une comparaison plus étroite entre les dispositifs fonctionnant en discontinu et en continu, l'eau du robinet avait été utilisée comme liquide recirculé dans l'étude précédente.

Dans la présente étude, l'effluent provenant de l'usine pilote de flottation sous pression a servi pour effectuer certains tests, afin de déterminer si l'utilisation de cet effluent recirculé influencerait les résultats des tests sur le dispositif en fonctionnement discontinu. Si l'influence était uniforme et importante, alors il est clair que le vrai liquide recirculé, c'est-à-dire l'effluent soumis à la flottation sous pression, devrait être utilisé dans les essais en fonctionnement discontinu, afin de simuler le plus possible le fonctionnement de l'usine pilote.

Le tableau 21 donne les résultats de huit tests. Un problème s'est posé lorsqu'est venu le moment de choisir lequel des trois paramètres afférents à l'effluent (la quantité de matières solides en suspension dans l'effluent, la captation des matières solides ou la réduction de la quantité de matières solides) devrait servir aux fins de comparaison. La réduction de la quantité de matières solides tient compte des matières solides en suspension dans l'affluent, alors que la captation des matières solides tient aussi compte de la quantité de matières solides présentes dans le liquide recirculé. Cependant, en particulier lorsque la clarification est la préoccupation première, la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent servira de mesure finale du comportement et c'est cette quantité qui doit être associée aux résultats sur l'usine pilote de flottation sous pression.

La comparaison se complique davantage à cause de la dose du polymère qui est calculée sur une base massique et qui est, par conséquent, affectée par la concentration de matières solides présentes dans le liquide recirculé. La dose sera très différente pour l'eau du robinet et pour l'effluent provenant de l'usine de flottation sous pression, même si

TABLEAU 21 COMPARAISON DES LIQUIDES RECIRCULÉS. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINNU - PHASE 2

Test	Dose du polymère (mg/g)	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Matières solides en suspension dans le liquide recirculé (mg/L)	Rapport A/MS	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Captation des matières solides (%)	Réduction des matières solides (%)
1	0	481	171	0,832	150	58	77
2	0	481	0	0,95	153	47	68
3	0	363	149	0,663	146	52	60
4	0	363	0	0,630	122	60	66
5	0,65	176	149	1,11	99	22	44
6	0,97	176	0	1,64	74	40	58
7	1,19	219	92	0,94	99	38	55
8	1,38	219	0	1,16	84	47	62

la concentration de matières solides en suspension dans l'affluent et la quantité du polymère ajoutée dans chaque test sont les mêmes.

Dans les tests effectuées avec les eaux d'égouts, la concentration de matières solides en suspension dans le liquide recirculé était semblable à la concentration de matières solides en suspension dans l'affluent, alors que dans les tests effectués avec la liqueur mixte, la concentration de matières solides en suspension dans le liquide recirculé était environ cent fois plus basse que celle de l'affluent, et n'affectait pas de façon significative les paramètres de l'effluent et la dose du polymère.

Les résultats des tests effectués sur le liquide recirculé n'ont pas été concluants. Les tests effectués sans polymère ont donné des résultats contradictoires (essais 1 à 4), les trois paramètres de l'effluent s'améliorant lorsque l'effluent de l'unité de flottation sous pression était utilisé comme liquide recirculé et se détériorant dans l'autre cas. Cependant, les différences étaient minimes. Avec le polymère, les paramètres de l'effluent se sont détériorés lorsque l'effluent de l'unité de flottation sous pression a été utilisé comme liquide recirculé, mais cette détérioration aurait pu être attribuée à la faible dose effective du polymère.

Il a été décidé, en se basant sur les tests, que l'effluent de l'unité de flottation sous pression devrait être utilisé comme liquide recirculé dans le dispositif en fonctionnement discontinu lorsque c'était possible; au pire, les résultats obtenus seraient conservateurs. Cependant, cet effluent pourrait être utilisé seulement dans les cas où le polymère n'est pas ajouté à l'usine pilote, car il est probable qu'il y aurait présence du polymère dans l'effluent, ce qui pourrait affecter substantiellement les résultats des tests effectués en discontinu.

6.2.5 $FeCl_3$ par rapport d'alun (sans polymère). Les tests 1 à 8 dans le tableau 22 montrent les effets du $FeCl_3$ et de l'alun sur la flottation en fonctionnement discontinu. Bien que la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent soit le facteur fondamental le plus important aux fins de comparaison, la captation des matières solides ne tient pas compte de l'effet des matières solides en suspension dans le liquide recirculé. Cet effet sera important lorsque la concentration de matières solides en suspension dans le liquide recirculé sera relativement élevée comparativement à la concentration de matières solides en suspension dans l'affluent comme, par exemple, dans les tests 2 et 6.

Tous les facteurs étant égaux, la qualité de l'effluent semble diminuer au fur et à mesure que la dose du produit chimique augmente. La comparaison la plus utile est celle entre les tests 1 et 3 dans le cas de l'addition de $FeCl_3$, et celle entre les tests 5 et 7 dans le cas de l'addition d'alun, car la concentration de matières solides en suspension dans l'affluent et le rapport A/MS ne changent pratiquement pas. Les résultats indiquent que des doses excessivement élevées entraînent une diminution de la qualité de l'effluent; cependant, on obtient des résultats semblables lorsque la dose d'alun est près de quatre fois supérieure à celle de $FeCl_3$.

Trois tests supplémentaires ont été effectués en ajoutant seulement du $FeCl_3$ dans le même échantillon d'affluent et sans changer pratiquement le rapport A/MS. Ces tests ont confirmé qu'une petite dose de $FeCl_3$ est bénéfique pour éliminer les matières solides, mais qu'une trop forte dose entraîne une augmentation de la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent. La dose critique était d'environ 15 mg/L de $FeCl_3$, mais il est probable que cette dose dépend de la concentration de matières solides en suspension dans l'affluent de même que de la concentration de phosphore soluble dans l'affluent.

TABLEAU 22 EFFET DU $FeCl_3$ ET DE L'ALUN SUR LA FLOTTATION. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2

Test	Produit chimique	Dose (mg/L)	Affluent		Matières solides en suspension dans le liquide recirculé (mg/L)	Rapport A/MS x 100	Effluent		Captation des matières solides (%)	Réduction des matières solides (%)	Réduction du phosphore soluble (%)
			Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)			Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)			
1	$FeCl_3$	10	187	-	63	2,03	22	-	84	88	-
2		25	108	-	63	3,04	29	-	68	73	-
3		25	195	-	107	1,84	64	-	78	67	-
4		40	217	-	143	1,42	68	-	64	69	-
5	Alun	40	187	-	63	2,02	22	-	84	88	-
6		50	108	-	63	3,10	31	-	65	71	-
7		100	195	-	107	1,86	81	-	72	58	-
8		160	217	-	143	1,52	74	-	60	66	-
9		-	177	3,3	-	2,61	55	2,9	47	69	12
10	$FeCl_3$	15	177	3,3	-	2,35	38	2,5	64	79	24
11		30	177	3,3	-	2,41	47	2,4	56	74	27

6.2.6 Interaction $FeCl_3$/Percol 757. L'objet de cette série de tests était de déterminer si la combinaison du $FeCl_3$ et du polymère (Percol 757) aurait un effet bénéfique sur l'élimination des matières solides, comparativement à l'addition d'une dose du polymère seulement. Le tableau 23 donne les résultats.

Ici encore, il a été impossible d'obtenir un débit avec une concentration de matières solides constante, et le rapport A/MS et la dose du polymère ont grandement varié.

La meilleure comparaison des tableaux 20 et 23 dans le cas des additions simples par rapport aux additions doubles se fait en se servant de la captation des matières solides, car la masse des matières solides dans l'effluent soumis à la flottation sous pression et utilisé comme liquide recirculé dans le dernier cas, est prise en considération. L'effluent de l'unité d'épuration à flottation sous pression a été utilisé comme liquide recirculé dans les tests effectués avec le $FeCl_3$, car on a jugé qu'il était préférable de se servir d'un liquide recirculé contenant une quantité de phosphore semblable ou égale à celui provenant de l'usine pilote de flottation sous pression. Comme il a été mentionné dans la section 6.2.4, les deux liquides recirculés différents ne devraient pas affecter les résultats en termes de comportement de la flottation. Par conséquent, on peut considérer que les résultats illustrent les effets des additions seulement.

Comme les concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent étaient semblables, les valeurs moyennes dans les neuf premiers tests, indiquées au tableau 20, devraient être comparées avec les tests 1 et 2 du tableau 23 et les valeurs moyennes du reste des essais dans le tableau 20, avec les essais 3 et 4 dans le tableau 23. Dans les deux cas, la captation des matières solides s'est améliorée lorsque le $FeCl_3$ et du polymère ont été ajoutés; en fait, même la qualité de l'effluent s'est améliorée, en dépit du fait que le liquide recirculé utilisé dans la deuxième série de tests contenait aussi des matières solides. On peut conclure qu'on peut obtenir un comportement amélioré lorsqu'une combinaison appropriée du polymère et de $FeCl_3$ est ajoutée aux eaux d'égouts.

6.3 Fonctionnement de l'usine pilote

Il a été surprenant de constater que peu de problèmes au niveau du fonctionnement se sont posés au cours de cette phase. À cause de la petitesse des particules et de la nature non floculante des eaux d'égouts, il n'y a pas eu autant de bouchons dans les tuyaux que dans le cas de la liqueur mixte et le fonctionnement en général a été plus simple et plus tranquille.

TABLEAU 23 COMBINAISON DU PRODUIT CHIMIQUE ET DU POLYMÈRE. DISPOSITIF DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 2

Test	Dose du produit chimique (mg/L)	Dose du polymère (mg/g)	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Matières solides en suspension dans le liquide recirculé (mg/L)	A/MS x 100	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Captation de matières solides (%)	Réduction de matières solides (%)
1	25	0,59	191	63	1,98	35	75	82
2	25	1,76	191	63	1,99	34	75	82
3	25	1,57	305	193	1,03	113	56	63
4	25	2,20	305	193	1,04	91	65	70

Le seul gros problème a été la quantité de cheveux et de poussière dans l'affluent. Ces corps ont eu tendance à s'accumuler sur les agitateurs des bassins de mélange rapide et de floculation, de même que sur toute saillie de la tuyauterie. Toutes les soupapes inutiles ont été enlevées des tuyaux et le nettoyage quotidien des lames des agitateurs a empêché que des blocs de cheveux n'atteignent le dispositif de flottation sous pression. Avec le nettoyage régulier de l'éjecteur, aucun problème ne s'est posé avec le système de réaération.

6.4 Résultats des tests à l'usine pilote

6.4.1 Introduction. L'annexe H contient les résultats des 72 tests effectués à l'usine pilote.

La grande dispersion des concentrations de matières solides dans l'affluent a posé des problèmes lors de l'analyse. Après de nombreux tests au niveau des représentants graphiques et statistiques et de l'analyse, les trois méthodes suivantes ont été appliquées:

a) Graphique des matières solides en suspension dans l'effluent par rapport au A/MS - Dans chacune des quatre séries de tests, ce graphique affichait des résultats instables et stables.

b) Graphique des probabilités afférentes au phosphore total et aux matières solides en suspension dans l'affluent et l'effluent - Les données sont présentées sous forme de graphique des probabilités cumulatives et indiquent quel pourcentage de tests ont

donné des résultats sous la valeur indiquée. L'échelle des probabilités s'est avérée normale, nécessitant la prise des données dans une population de distribution normale. Un programme-produit d'ordinateur, utilisé pour vérifier tout l'ensemble des données portant sur les matières solides en suspension dans l'affluent, a donné les résultats suivants:

- L'hypothèse de zéro voulant que la variation dans la concentration de matières solides en suspension dans l'affluent soit normalement distribuée a été acceptée avec un seuil de confiance de 0,05.
- Nombre d'échantillons 71
- Concentration moyenne des matières solides en suspension 216,3 mg/L
- Asymétrie 0,83
- Écart-type 103,5
- Courbure 3,72
- Étendue de l'écart-type 5,26

Ainsi, bien que l'hypothèse de zéro ait été acceptée avec un seuil de confiance de cinq pour cent, la courbe de distribution présente une asymétrie positive et une forme leptokurtique. Cette divergence de la normalité idéale apparaît aussi dans les graphiques des probabilités de chaque section où, étant donné que les échantillons sont plus petits, la divergence est plus marquée. Néanmoins, comme il n'existait aucune autre technique d'analyse des données utile, cette méthode de représentation graphique des probabilités est utilisée ici pour fins de comparaison.

c) Graphique du coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS et comparaison de la pente de ce graphique avec le paramètre d'épaississement - Comme le PE lui-même varie grandement, on a aussi obtenu pour ce paramètre un graphique des probabilités cumulatives.

D'autres graphiques, comme celui représentant les matières solides en suspension dans l'effluent par rapport à la charge de matières solides, n'ont révélé aucune tendance durant la série de tests. Cependant, la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent a augmenté lorsque les concentrations des matières solides en suspension dans l'affluent étaient anormalement élevées. Dans ces cas, le rapport A/MS et la dose du polymère représentée en mg/g affichaient toujours une baisse correspondante. Ainsi, on peut assumer que le paramètre de la charge de matières solides, par exemple, n'aurait aucune relation avec les diverses concentrations de matières solides en

suspension dans l'effluent qui ont fait l'objet de ces tests, pourvu qu'il y ait assez d'air, et probablement du polymère, pour permettre au rappport A/MS et à la dose du polymère de demeurer au niveau désiré pour le fonctionnement.

6.4.2 Concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent par rapport au A/MS. Les figures 12, 13, 14 et 15 montrent l'effet du rapport A/MS sur la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent pour les quatre séries de tests. Dans chaque cas, il semble y avoir un rapport A/MS préférable au-dessus duquel (sauf dans le cas d'un résultat représenté à la figure 15) on obtient une concentration des matières solides en suspension dans l'effluent faible et stable. Le tableau 24 montre le rapport A/MS et les niveaux (supérieurs) stables de concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent obtenus pour les quatre tests. Le point où un changement se fait a été choisi visuellement et semble varier entre un A/MS de 0,2 et 0,4, comme l'indique le tracé arbitraire sur les figures 12 à 15.

Il semble qu'une combinaison appropriée du polymère et de $FeCl_3$ produise le meilleur effluent. Cependant, la valeur faible de la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent provient d'un test seulement et aucune conclusion définitive ne peut être tirée.

En termes de rentabilité, il est probable que le fonctionnement qui se ferait sans polymère et produirait une qualité de l'effluent légèrement inférieure avec un rapport A/MS supérieur de 33 pour cent serait préférable à deux additions. Cependant, le tableau ne donne pas d'indication sur la stabilité du processus dans des conditions de surcharge.

6.4.3 Concentration de phosphore total et de matières solides en suspension dans l'affluent et l'effluent. Le tableau 25 donne un résumé des valeurs de probabilité de 50 pour cent et de 90 pour cent.

a) Élimination du phosphore total - En utilisant la valeur 50 pour cent comme estimation de la moyenne, la meilleure réduction du phosphore total en pourcentage a été obtenue en ajoutant du $FeCl_3$ et du polymère. On peut considérer la valeur 90 pour cent comme valeur indiquant le comportement dans des conditions extrêmes. Comme on peut s'y attendre, l'élimination du phosphore est reliée de très près à l'élimination des matières solides en suspension.

b) Élimination des matières solides - Avec la probabilité de 50 pour cent, c'est-à-dire la valeur moyenne, l'addition seule de $FeCl_3$ a donné le pire rendement, et celui du

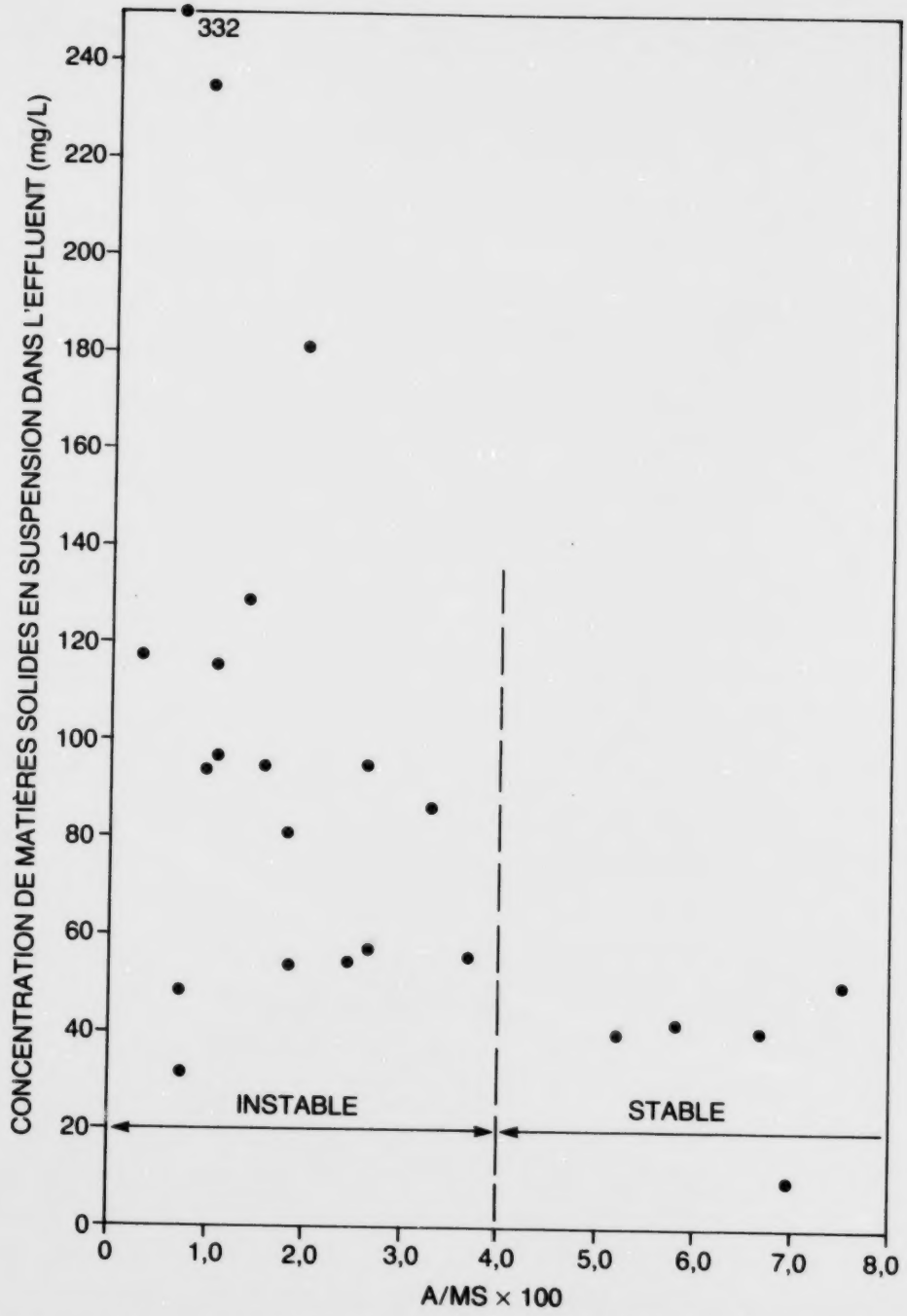


FIGURE 12 CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, AUCUNE ADDITION. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

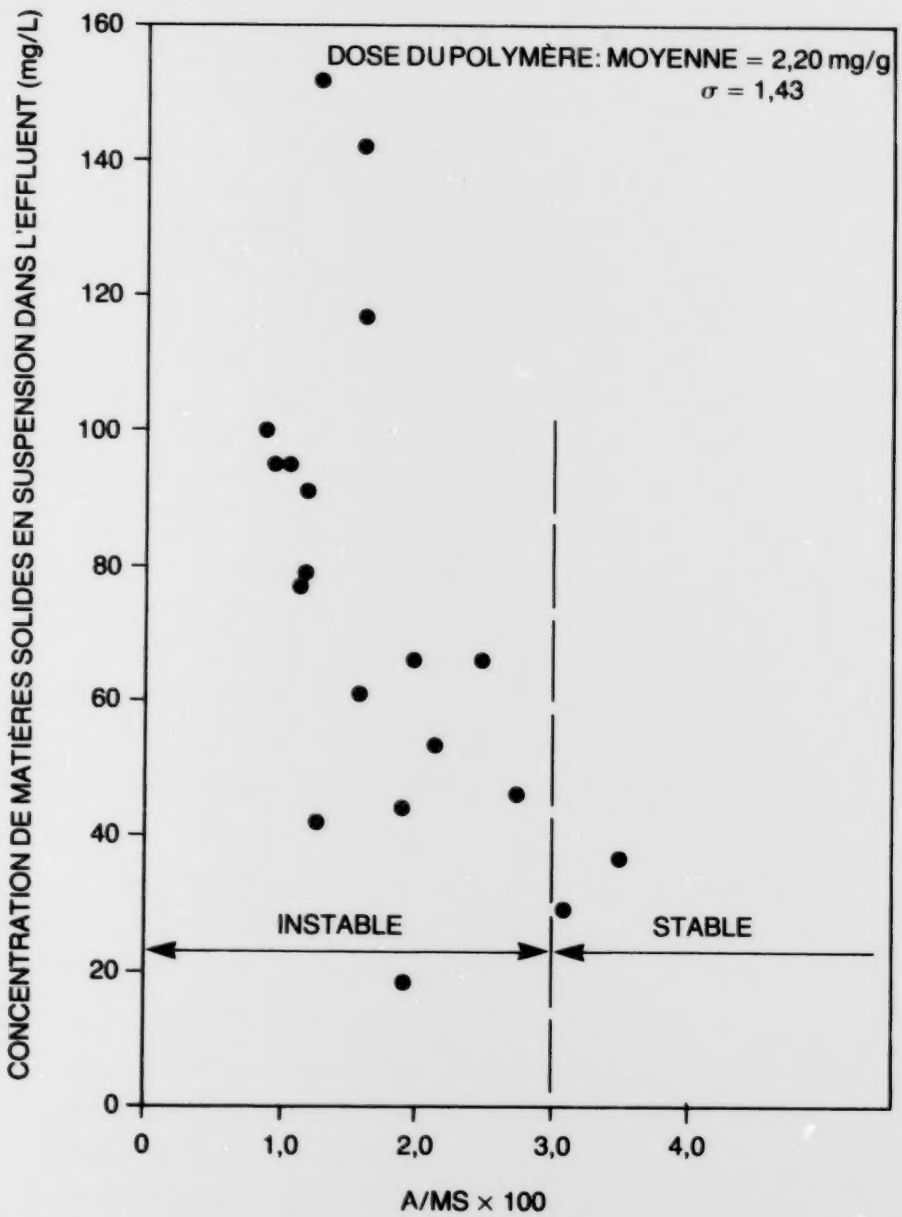


FIGURE 13 CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC ADDITION DU POLYMÈRE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

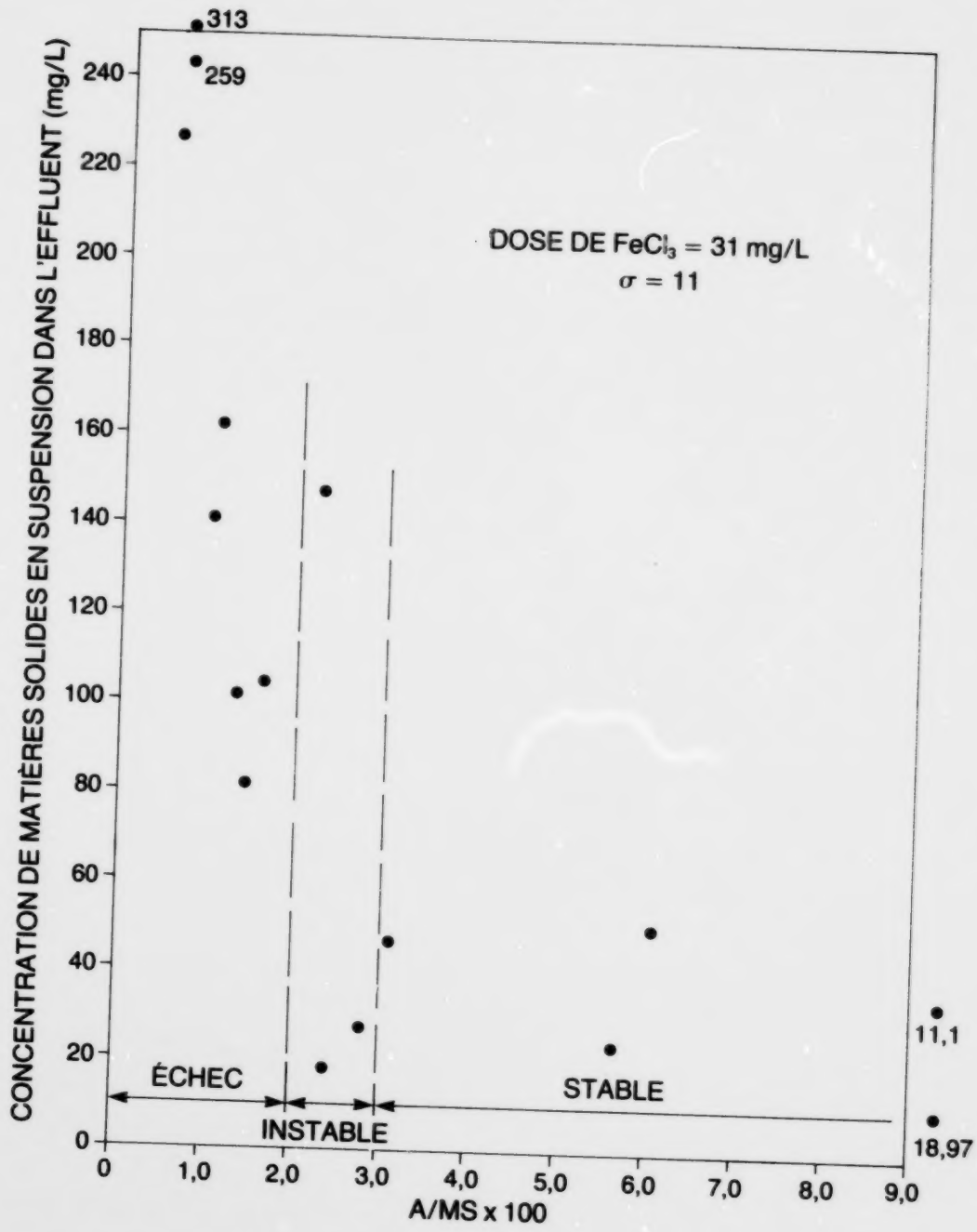


FIGURE 14 CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC ADDITION DE $FeCL_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

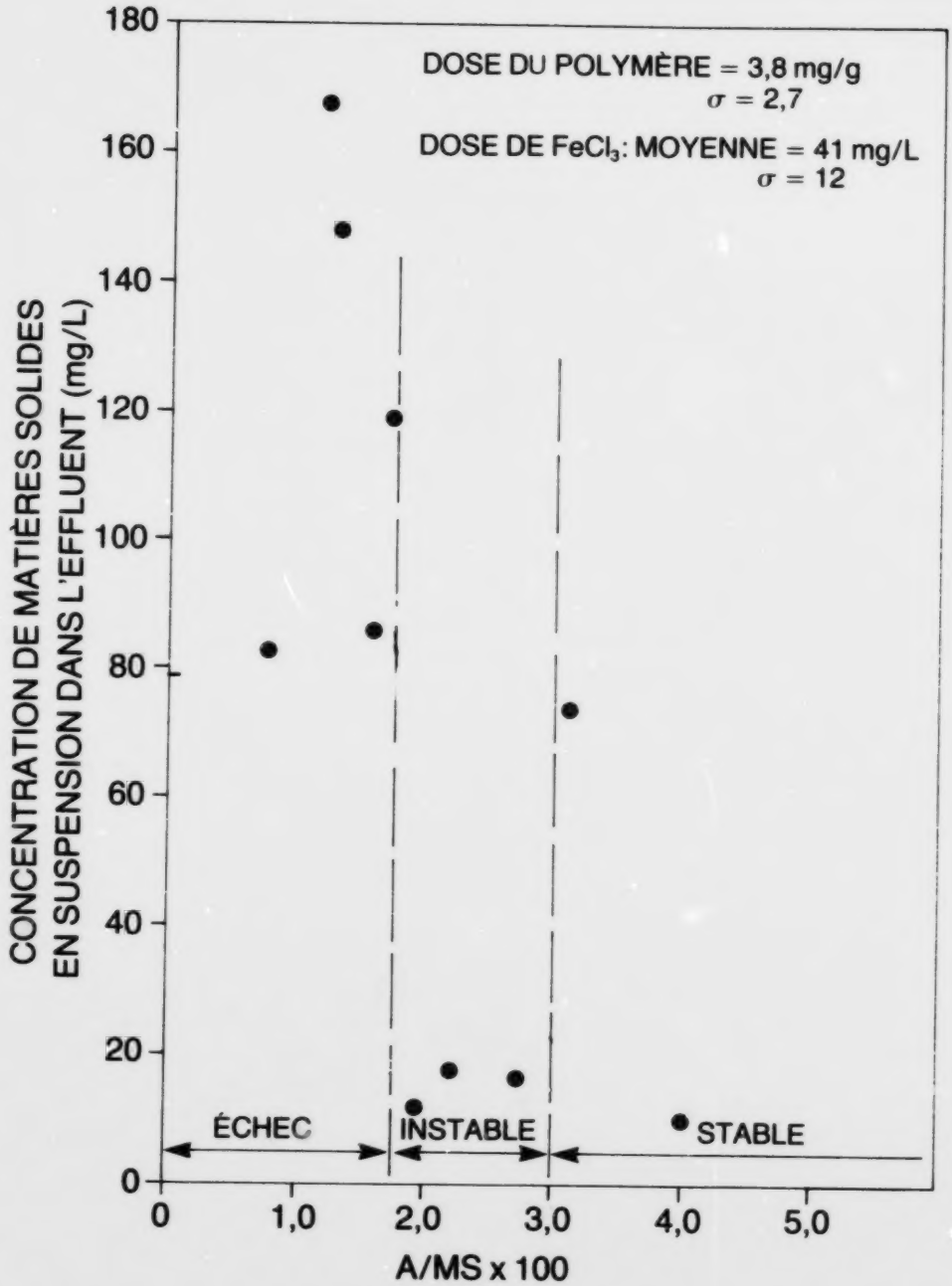


FIGURE 15 CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC ADDITION DU POLYMÈRE ET DE $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

TABLEAU 24 RAPPORT A/MS MINIMAL POUR LA CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT POUR LES QUATRE TESTS EXPÉRIMENTAUX. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

Série de tests	Figure	A/MS	Concentration maximale stable obtenue de matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)
1) Aucune addition	12	>0,4	50
2) Addition du polymère (en moyenne, 2,2 mg/g)	13	>0,3	40
3) Addition de $FeCl_3$ (en moyenne, 31 mg/L)	14	>0,3	50
4) Addition du polymère et de $FeCl_3$ (en moyenne, 3,8 mg/L et 4,1 mg/L)	15	>0,35	20

polymère, le meilleur. D'après la valeur 90 pour cent, il semble que l'addition du $FeCl_3$ affecte légèrement l'élimination des matières solides en suspension (tableau 25). L'addition seule du polymère a donné la meilleure stabilité en termes d'élimination uniforme. Cette stabilité fait suite à l'élimination dans les pires conditions, c'est-à-dire à une valeur de 90 pour cent. La concentration de matières solides en suspension qui est apparue dans 95 pour cent des tests effectués était inférieure à 25 mg/L lorsque le $FeCl_3$ et le polymère étaient ajoutés. L'élimination est aussi bonne au niveau de probabilité le plus élevé, mais les données à cet effet sont insuffisantes pour tirer des conclusions définitives.

En résumé, les valeurs de probabilité montrent que l'addition seule du polymère donne le rendement le plus stable en termes d'élimination du phosphore total et des matières solides en suspension.

Cette conclusion ne signifie pas que l'addition de $FeCl_3$ n'est pas préférable pour l'élimination du phosphore soluble; en fait, les expériences antérieures indiquent que l'utilisation seule du polymère n'élimine pas le phosphore soluble. Il faut aussi remarquer que les valeurs de probabilité ne tiennent pas compte des variations du rapport A/MS et de la dose de polymère (calculée sur une base massique). De plus, la différence dans l'élimination des matières solides en suspension entre les cas où il n'y a pas d'addition du

TABLEAU 25 RÉSUMÉ DES PROBABILITÉS CONCERNANT L'ÉLIMINATION DU PHOSPHORE TOTAL ET DES MATIÈRES SOLIDES DANS LES EAUX D'ÉGOUTS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

	Phosphore total (mg/L)		Matières solides en suspension (mg/L)	
	Probabilité en %		Probabilité en %	
	50	90	50	90
Aucune addition				
Affluent	4,4	8,8	230	390
Effluent	4,4	5,6	80	200
Réduction en %	0	36	65	49
Addition du polymère[1]				
Affluent	6,5	8,8	220	370
Effluent	4,3	5,6	70	150
Réduction en %	34	36	68	59
Addition de $FeCl_3$[2]				
Affluent	3,1	7,8	140	330
Effluent	1,9	6,8	80	220
Réduction en %	39	13	43	33
Addition du polymère et de $FeCl_3$[3]				
Affluent	3,0	5,6	170	360
Effluent	1,4	5,4	80	160
Réduction en %	53	3	53	55

(1) Doses moyennes: 2,19 mg/g; σ = 1,43 mg/g
(2) Doses moyennes: 30 mg/L; σ = 10 mg/L
(3) Doses moyennes: 3,84 mg/g et 41 mg/g; σ = 2,68 mg/g et 12 mg/g (polymère et $FeCl_3$, respectivement)

polymère et ceux où il y a addition du polymère n'est pas assez grande pour dire de façon catégorique qu'il est nécessaire d'ajouter du polymère. Comme il a été mentionné plus tôt, il est probable que l'on puisse exclure le polymère en se basant sur des facteurs économiques et que l'on puisse tolérer un certain niveau de diminution de la qualité de l'effluent lorsque le système est surchargé.

6.4.4 Coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS et paramètre d'épaississement. Les figures 17 à 20 montrent le coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS pour les quatre conditions afférentes à l'addition du polymère et (ou) du produit chimique, et le tableau 26 résume la comparaison, du point de vue statistiques, de la pente de ces graphiques avec le PE. La variation du PE durant ces expériences est représentée dans un graphique à la figure 16. Bien que la variation du PE est relativement étendue, elle ne l'est pas autant que celle du A/MS; on peut le voir en comparant leur coefficient de variation.

Il est évident que l'addition du polymère est préférable. La valeur du paramètre d'épaississement moyen est la plus élevée. L'hypothèse voulant que le PE soit égal à la pente du graphique représentant le coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS est acceptée avec confiance à un seuil de signification de cinq pour cent, et le graphique des probabilités affiche des valeurs PE uniformément plus élevées pour toutes les probabilités comparativement aux trois autres conditions expérimentales.

La présente analyse est la seule qui tienne compte du comportement en termes d'épaississement et de concentration du floc; les deux précédentes ne tenaient compte que de la qualité de l'effluent. Dans le cas présent, il est clair que l'addition de $FeCl_3$ est nuisible et ceci apparaît évident lorsqu'on examine la pente et les valeurs PE, car plus le PE est élevé, plus le comportement s'améliore. Il semble aussi qu'avec un rendement plus stable et plus efficace, la valeur du PE s'approche plus de celle représentée par la pente, et la valeur de la partie interceptée est proche de zéro (lorsque la partie interceptée = zéro, la pente = PE).

6.4.5 Réduction de la DCO. Au cours de cette étude, le comportement a été mesuré en termes d'élimination des matières solides ou d'épaississement des boues et l'élimination du phosphore a aussi été contrôlée. De plus, durant la phase 2 où l'on a envisagé la technique de flottation sous pression comme méthode de traitement primaire, la DCO a été mesurée dans la plupart des tests. Le tableau 27 donne les résultats de ces mesures. Il donne seulement les valeurs moyennes, ce qui en fait donc un résumé supercifiel. Aucun test n'a été fait pour établir une relation entre les paramètres d'épaississement et l'élimination de la DCO.

On a obtenu le meilleur comportement en termes d'élimination de la DCO lorsque le polymère a été ajouté. On s'y attendait, car l'élimination totale de la DCO est associée à l'élimination des matières solides en suspension.

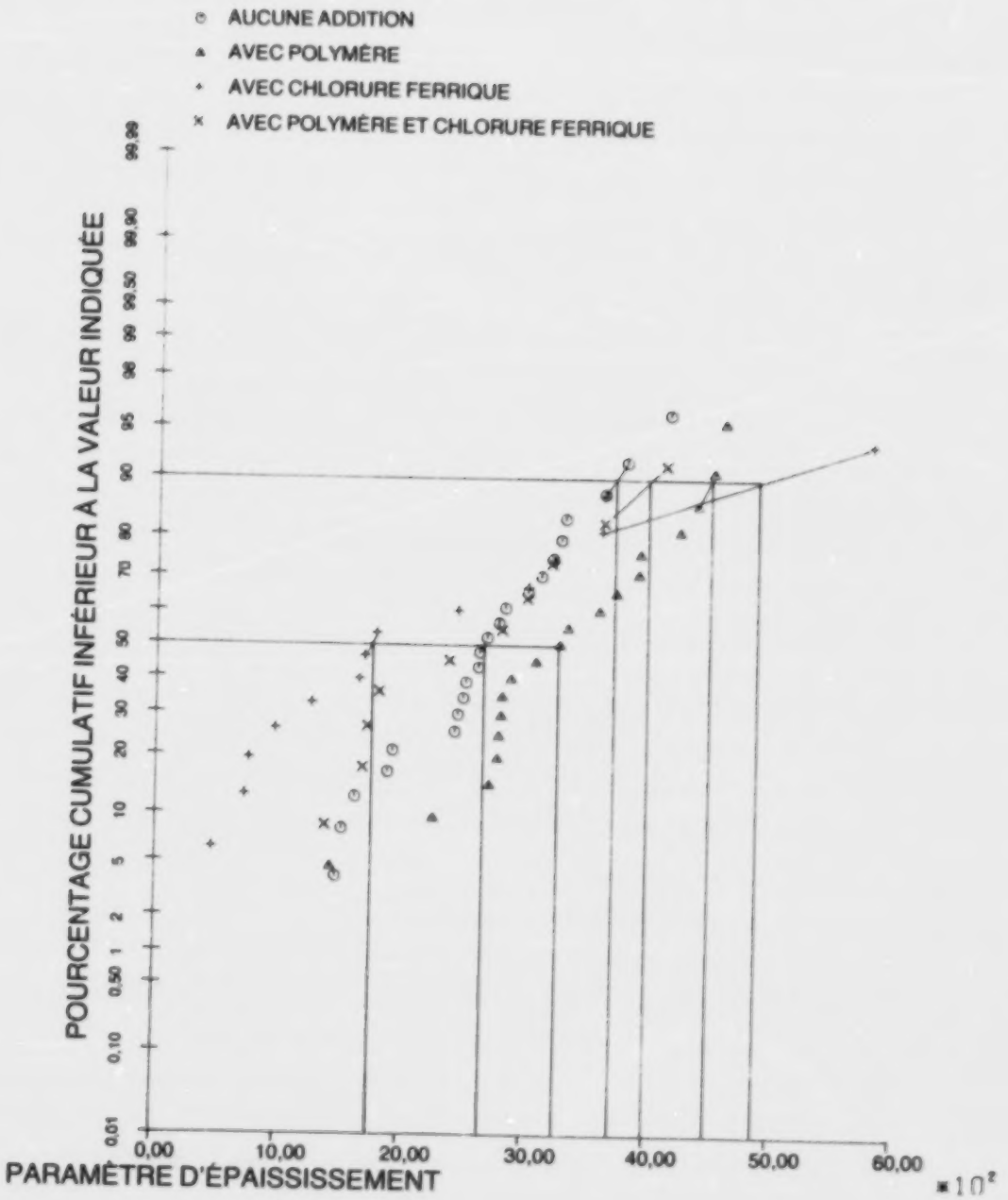


FIGURE 16 GRAPHIQUE DES PROBABILITÉS POUR LA VARIATION DU PARAMÈTRE D'ÉPAISSISSEMENT. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

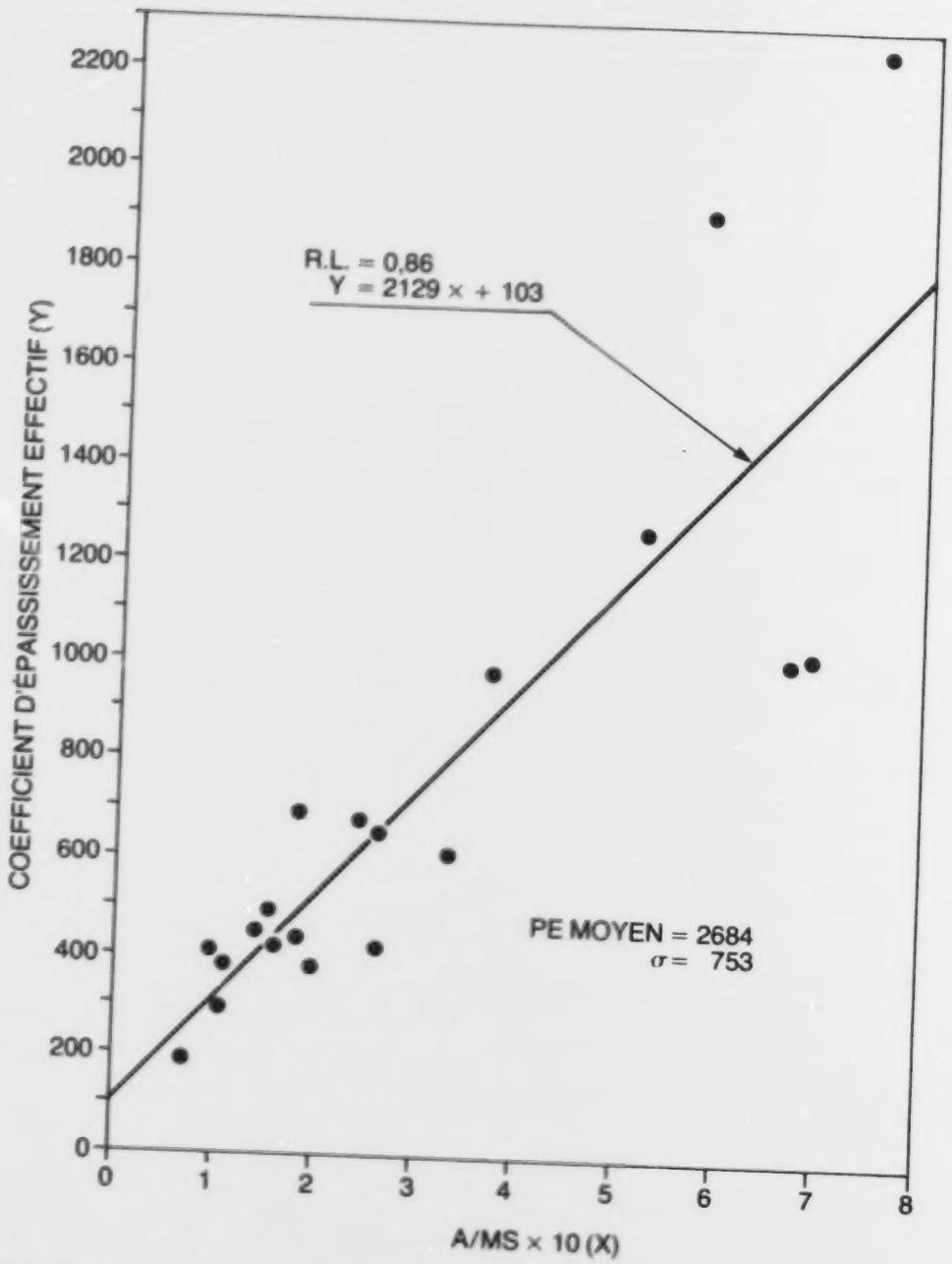


FIGURE 17 COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AUCUNE ADDITION. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

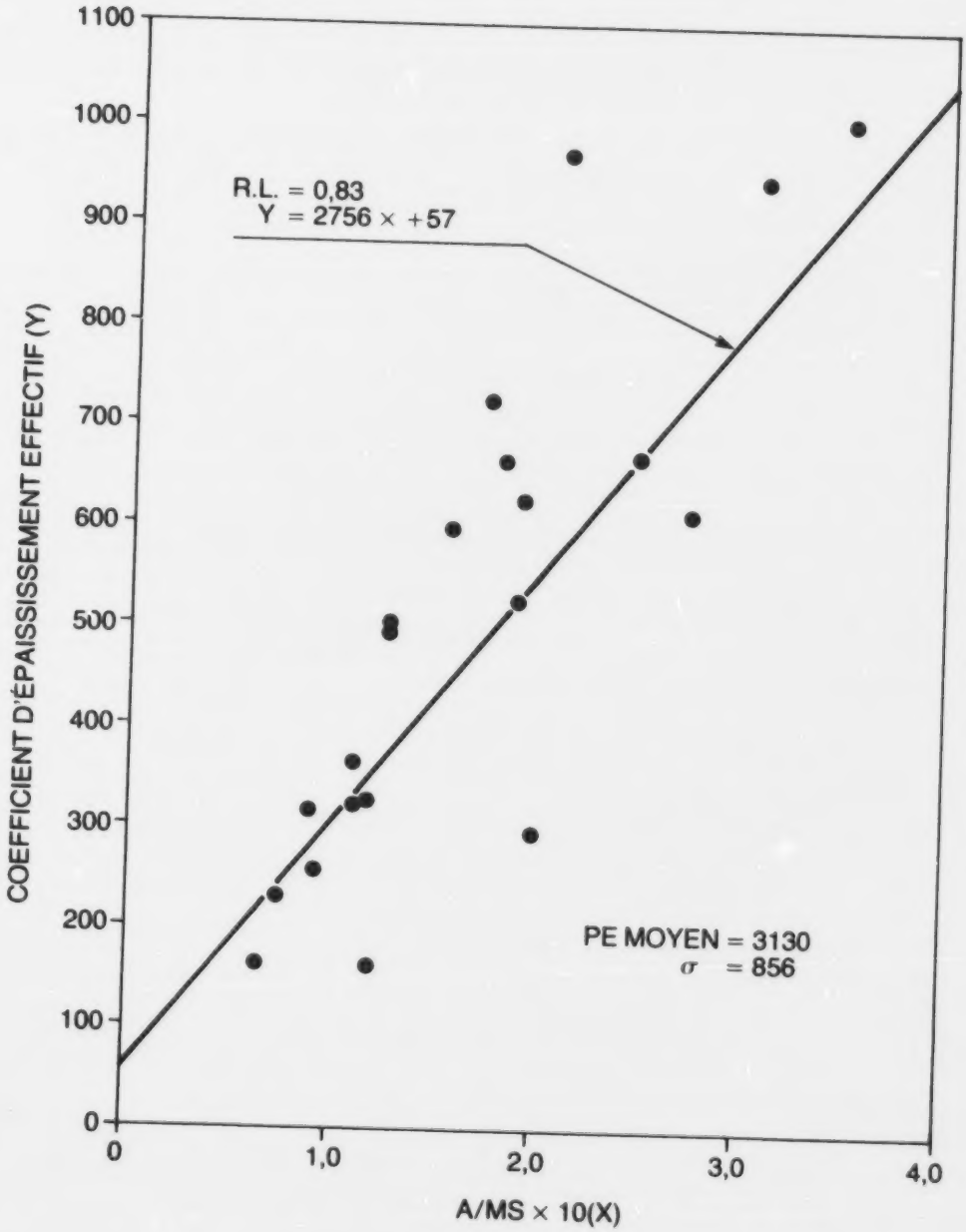


FIGURE 18 COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC POLYMÈRE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

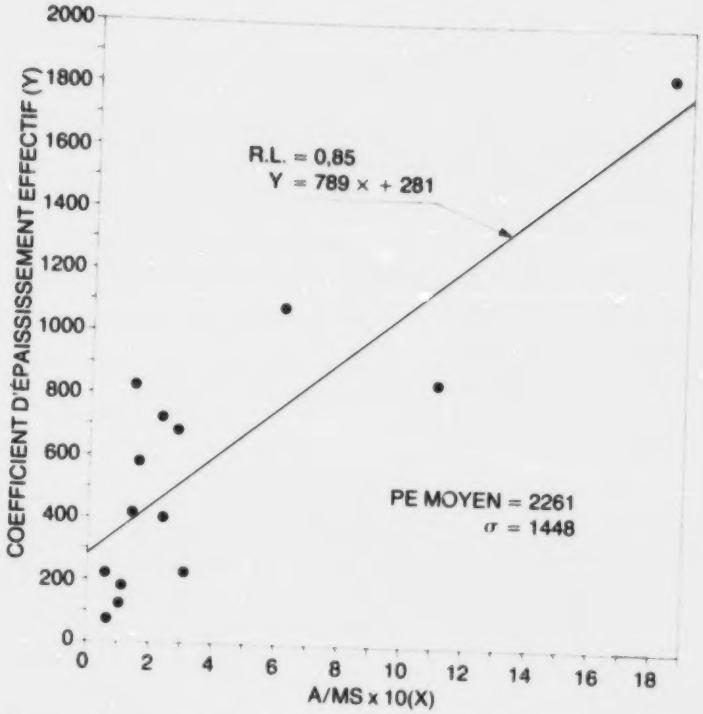


FIGURE 19 COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

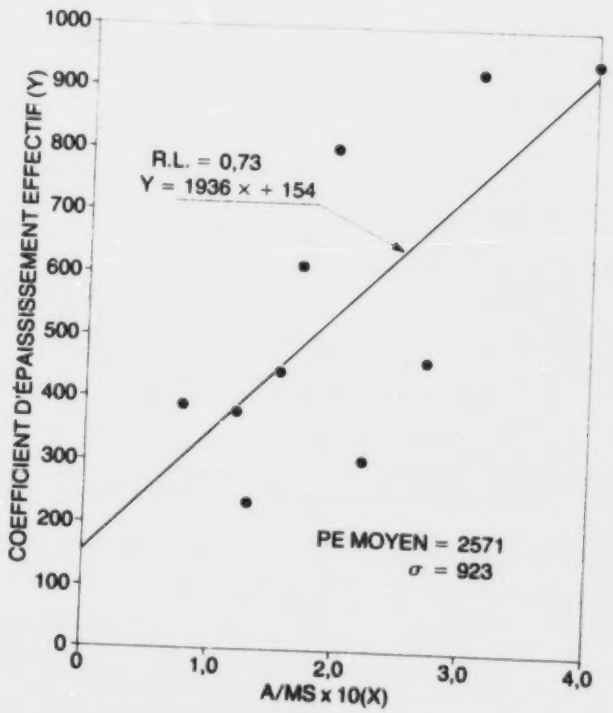


FIGURE 20 COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC POLYMÈRE ET $FeCL_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

TABLEAU 26 RÉSUMÉ SUR LE FLOC TOTAL ET LE RAPPORT A/MS ET COMPARAISON STATISTIQUE ENTRE LE PE ET LA PENTE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

Produit chimique (dose moyenne)	Nombre d'échantillons	Concentration moyenne du floc total (σ)	Rapport A/MS moyen (σ)	RL/Pente/Y du graphique	PE moyen (σ)	Hypothèse de zéro @ 5% et commentaires
Aucun	20	5,85 (1,69)	0,347 (0,260)	0,86 2129 103	2684 (753)	Rejeté (PE = pente)
2,2 mg/g du polymère	21	5,66 (1,68)	0,166 (0,0776)	0,83 2756 57	3130 (856)	Accepté (PE = pente)
31 mg/L de $FeCl_3$	14	4,02 (2,0)	0,379 (0,490)	0,85 789 281	2261 (144°)	Non pertinent (Dispersion très vaste des données)
3,8 mg/g du polymère, 41 mg/L de $FeCl_3$	10	4,94 (1,06)	0,205 (0,098)	0,73 1936 154	2571 (923)	Accepté (Trop peu d'échantillons pour tirer une conclusion définitive)

A/MS = Rapport air/matières solides
Graphique = Graphique du coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS
PE = Paramètre d'épaississement
σ = Écart-type
RL = Coefficient de régression linéaire
Y = Interception sur l'axe des Y

TABLEAU 27 RÉSUMÉ DE LA RÉDUCTION DE LA DCO. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

Condition	Nombre d'échantillons	DCO moyenne dans l'affluent (mg/L)	DCO moyenne dans l'effluent (mg/L)	Réduction moyenne de la DCO (%)
Aucune addition	16	515	316	39
Addition du polymère	19	492	271	45
Addition de $FeCl_3$	11	356	273	23
Addition du polymère et de $FeCL_3$	4	410	295	28

La réduction de la DCO soluble dans l'usine a été mesurée dans cinq cas. Les résultats étaient irréguliers (0-40 pour cent) et aucune conclusion n'est tirée.

6.4.6 Comportement prévu. Les résultats présentés au tableau 28 sont les valeurs prévues dans les conditions de fonctionnement données. Les conditions de charge ont été choisies avec réserve, car les caractéristiques des eaux d'égouts varient beaucoup. L'usine pilote de flottation sous pression a très bien fonctionné sous des charges hydrauliques jusqu'à 50 pour cent supérieures à celles indiquées et avec une dose du polymère nulle. On a obtenu des concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent aussi basses que 18 mg/L et un floc total variant jusqu'à 9 pour cent. Le facteur critique, en termes de comportement stable et de qualité de l'effluent, est le rapport air/matières solides. Il est vital qu'il soit maintenu à 0,3 ou au-dessus. La flottation sous pression des eaux d'égouts brutes était bien plus sensible au rapport A/MS que celle avec la liqueur mixte.

6.5 Mise à l'échelle

Le tableau 29 donne une comparaison des comportements avec le dispositif en fonctionnement discontinu et le dispositif pilote. Comme il a été impossible d'obtenir des échantillons de floc de l'unité de flottation en fonctionnement discontinu aux fins d'analyse, la comparaison se base sur les concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent seulement. Naturellement, ceci limite le caractère utile des tests en discontinu, en particulier lorsque le comportement optimal en termes d'épaississement ne coincide pas avec la clarification optimale.

TABLEAU 28 RÉSUMÉ DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT RECOMMANDÉES ET RÉSULTATS PRÉVUS POUR LE COMPORTEMENT. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

Conditions de fonctionnement recommandées	
Affluent	91 L/min
Matières solides en suspension dans l'affluent	220 mg/L
Polymère	2,2 mg/g
$FeCl_3$	Non ajouté
Rapport A/MS	0,3
Charge hydraulique	6,5 m/h
Charge des matières solides	1,44 $kg/m^2 \cdot h$
Résultats prévus	
Matières solides en suspension dans l'effluent	40 mg/L
Floc total	5,7%
PE	3000

L'unité en fonctionnement discontinu a donné une indication fiable du rapport air /matières solides nécessaire pour obtenir un effluent stable, avec moins de, disons, 50 mg/L de matières solides en suspension. La forme des données portant sur les matières solides en suspension dans l'effluent par rapport au A/MS était clairement instable-stable, et les concentrations prévues de matières solides en suspension dans l'effluent pour un rapport A/MS supérieur à 0,2, lors de l'addition du polymère et (ou) de $FeCl_3$, étaient semblables à celles provenant de l'unité en fonctionnement discontinu et de l'usine pilote. Les résultats des tests sur l'unité en fonctionnement discontinu effectués avec seulement du polymère n'ont montré aucune amélioration réelle par rapport aux tests sans polymère, mais lors de l'addition de $FeCl_3$, le comportement s'est amélioré.

Ces résultats ont été confirmés par les tests à l'usine pilote; cependant, les tests à l'usine pilote ont démontré que la stabilité dans des conditions de charges anormales élevées s'améliorait avec l'addition du polymère, et que des valeurs légèrement inférieures pour le rapport A/MS seraient nécessaires pour obtenir un comportement stable avec l'utilisation du polymère. Par définition, des tests en discontinu ne peuvent pas donner de renseignements sur la stabilité en fonctionnement continu.

TABLEAU 29 COMPARAISON ENTRE LE COMPORTEMENT AVEC L'UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU ET L'USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2

		En discontinu	Pilote
Pression (kPa)		276	360 - 415
A/MS	Aucune addition	0,3	0,4
	Polymère	-	0,3
	$FeCl_3$	-	0,3
	Polymère + $FeCl_3$	-	0,3
		La concentration de matières solides en suspension dans l'effluent par rapport au A/MS montre une forme instable-stable.	La concentration de matières solides en suspension dans l'effluent par rapport au A/MS montre une forme instable-stable
Dose du polymère		La qualité de l'effluent ne s'est pas vraiment améliorée avec le polymère.	Une addition de 2,2 mg/g du polymère a amélioré tous les aspects du comportement.
Matières solides flottantes totales		Impossible de mesurer la concentration de matières solides flottantes.	Voir le tableau 26
Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Aucune addition	<65	<50
	Polymère	Moyenne <50 pour les matières solides en suspension dans l'affluent, 250 mg/L	<40
	$FeCl_3$	<30 pour le $FeCl_3$ 10-25 mg/L	<50
	Polymère + $FeCl_3$	<40 pour les matières solides en suspension dans l'affluent, 200 mg/L	<20 (un essai seulement)
Pente		Tous pour A/MS 0,2	Tous pour A/MS 0,3
		Aucune mesure des matières solides flottantes totales	Voir le tableau 26
PE		Aucune mesure des matières solides flottantes totales	Voir le tableau 26

TABLEAU 29 COMPARAISON ENTRE LE COMPORTEMENT AVEC L'UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU ET L'USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 2 (SUITE)

	En discontinu	Pilote
Effet du $FeCl_3$ ajouté	Bénéfique à une dose de 15 mg/L pour la qualité de l'effluent lorsque la concentration de matières solides en suspension dans l'affluent est d'environ 200 mg/L. Comportement optimal avec polymère + $FeCl_3$	Bénéfique pour la qualité de l'effluent, seulement si ajouté avec du polymère. Nuisible au floc

La décision de savoir si les conditions optimales pour la clarification ou pour l'épaississement devraient s'appliquer est expliquée par les résulats obtenus pour l'usine pilote. Les expériences ont clairement démontré que l'addition de $FeCl_3$ nuirait à l'épaississement (c'est-à-dire réduirait la valeur du PE), alors que la qualité de l'effluent s'améliorerait. Ces critères de comportement contradictoires n'ont pu être prévus dans les tests en discontinu, car il était impossible de mesurer le floc total.

6.6 Facteurs économiques afférents à la flottation des eaux d'égouts

La flottation des eaux d'égouts brutes (220 mg/L de matières solides en suspension) a produit 5,7 pour cent de floc et enlevé 80 pour cent et 45 pour cent de matières solides en suspension et de DCO, respectivement. La décantation primaire effectuée avec un produit chimique aurait pu donner des résultats semblables. Les deux options peuvent donc être directement comparées.

Les critères modèles pour la flottation des eaux d'égouts (où la charge hydraulique prévaut) proviennent des résultats de la phase 2. Les vitesses de déversement nécessaires à l'établissement des capacités des dispositifs de décantation concordent avec la pratique actuelle du ministère de l'Environnement de l'Ontario. Tous les critères modèles qui ont un effet sur les coûts sont contenus dans l'annexe K. Ceux qui sont pertinents dans le cas de la flottation ou de la décantation des eaux d'égouts brutes sont:

Opération	Charge hydraulique moyenne	Facteur de débit de pointe
Flottation (eaux d'égouts)	6,5 m/h	1,5
Décantation primaire	0,82 m/h	2,5 -3

Les coûts afférents à la flottation ou à la décantation des eaux d'égouts pour des débits de 4 500, 45 500 et 227 000 m^3/j sont basés sur les récents contrats de construction et les frais annuels applicables au sud de l'Ontario. L'annexe K donne les détails à ce sujet et le tableau 30 résume les coûts totaux relatifs aux eaux d'égouts.

TABLEAU 30 COMPARAISON DES COÛTS: EAUX D'ÉGOUTS

	Vitesse du débit		
	4 500 m^3/j	45 500 m^3/j	227 000 m^3/j
Coûts en capital			
Flottation (eaux d'égouts)	390 000$	2 437 000	9 330 000
Décantation primaire	125 000	965 000	4 260 000
Exploitation et entretien			
Flottation (eaux d'égouts)	25 900	207 000	1 031 000
Décantation primaire	7 100	45 700	212 600

7 RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES ET DISCUSSION - PHASE 3 (ÉPURATION ORDINAIRE PAR BOUES ACTIVÉES)

7.1 Essais de floculation

Les doses de produits chimiques suivantes étaient celles requises pour obtenir un effluent contenant moins de 0,1 mg/L de phosphore soluble au lieu de 0,8 mg/L:

Alun	120 mg/L
$FeCl_3$	25 mg/L

Ces doses concordent avec la tendance démontrée dans les phases 1 et 2, c'est-à-dire une quantité de $FeCL_3$ considérablement plus petite que celle d'alun est nécessaire pour éliminer de la même façon le phosphore. La chaux n'a pas fait l'objet de tests dans cette phase, à cause des résultats médiocres obtenus dans les deux études antécédentes. L'Annexe D donne un tableau complet des résultats des essais de floculation.

En se basant sur les essais de floculation, le chlorure ferrique à une dose de 25 mg/L a été utilisé dans les tests à l'usine pilote, afin d'étudier les conséquences de l'addition d'agents de déphosphoration sur le comportement de la flottation sous pression.

7.2 Essais de flottation en fonctionnement discontinu

7.2.1 Détermination du rapport A/MS optimal. De la liqueur mixte provenant d'une usine d'épuration ordinaire par boues activées a été utilisée comme affluent et l'effluent provenant de l'usine, comme liquide recirculé. Six tests ont été effectués afin de déterminer le rapport A/MS optimal. Les paramètres pris en considération étaient les matières solides flottantes totales, la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent et le paramètre d'épaississement. Les résultats sont représentés sur les figures 21 et 22.

Avec la liqueur mixte, il a été possible d'obtenir un point optimal distinct pour le rapport A/MS en termes de matières solides flottantes totales; pour un rapport A/MS de 0,028, la concentration la plus élevée a été de 6,94 pour cent. À des valeurs inférieures et supérieures (A/MS), la concentration du floc diminuait (figure 29).

Ce résultat précis du rapport A/MS optimal n'avait pas été prévu, mais peut s'expliquer par le fait que la concentration de matières solides en suspension dans l'affluent était relativement uniforme durant toute la série des six tests. Cependant, en termes de qualité de l'effluent, il n'y avait aucune relation distincte entre la concentra-

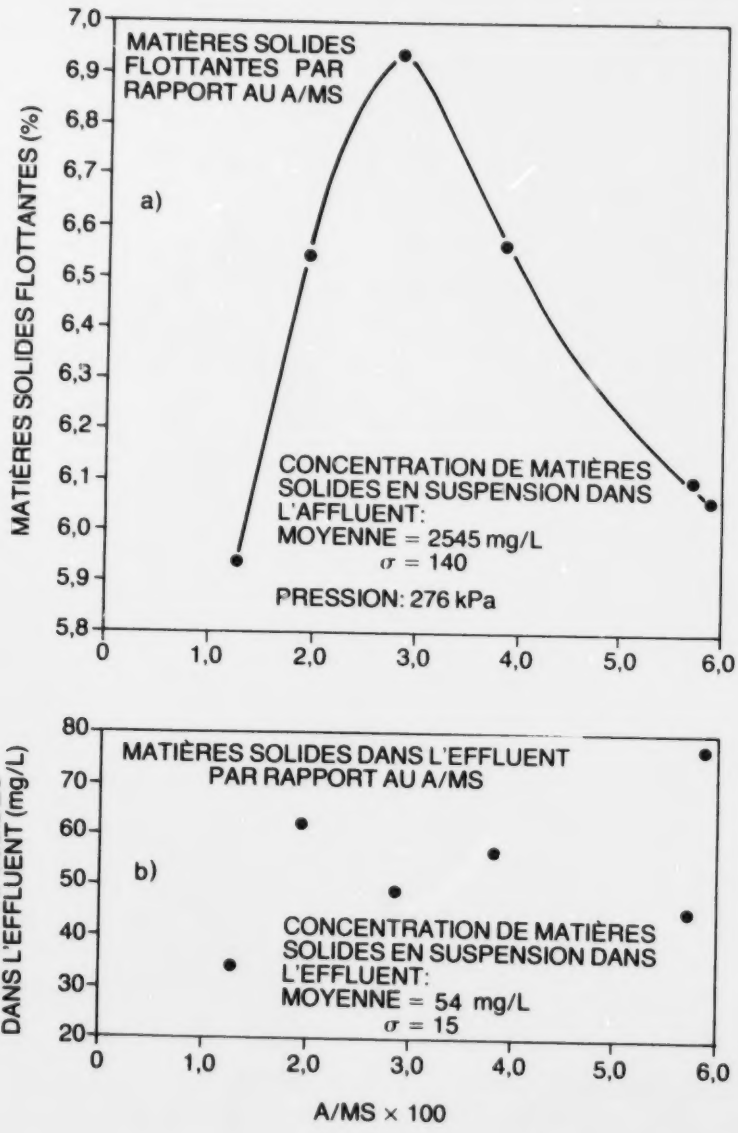


FIGURE 21 MATIÈRES SOLIDES DANS L'EFFLUENT ET LE FLOC PAR RAPPORT AU A/MS, SANS POLYMÈRE - PHASE 3

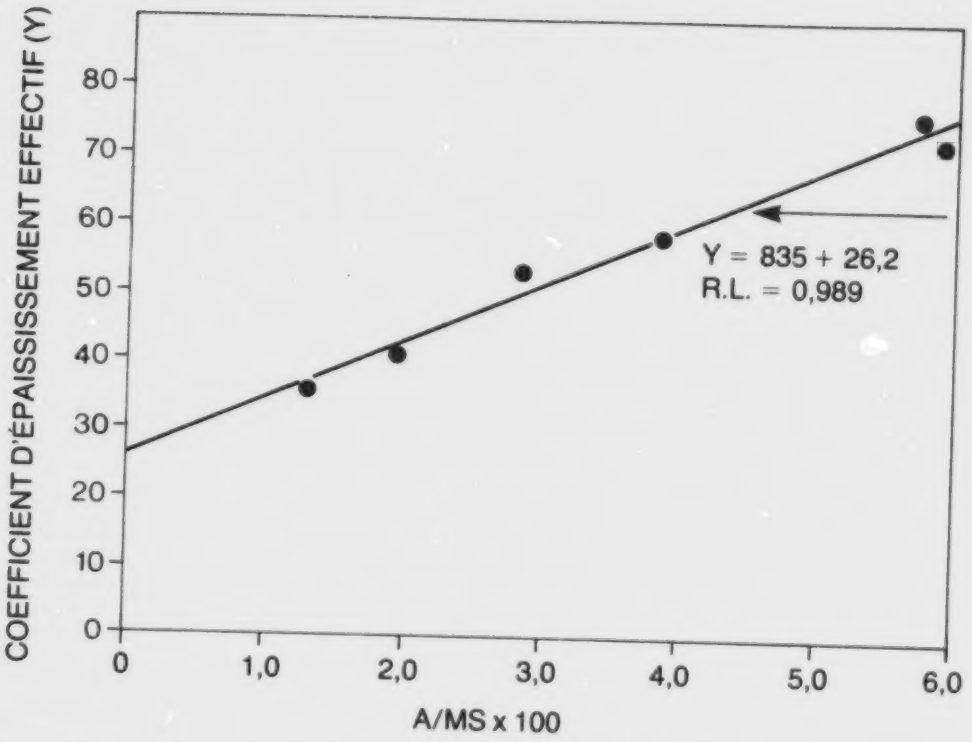


FIGURE 22 COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, SANS POLYMÈRE. UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 3

tion de matières solides en suspension dans l'effluent et le rapport A/MS, contrairement à la phase 2 (flottation des eaux d'égouts brutes); ce phénomène concorde avec les travaux antérieurs effectués avec la liqueur mixte et les boues activées (Gehr et Henry, 1976).

La figure 22 représente un graphique du coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS: la corrélation linéaire est extrêmement bonne (0,989), mais la pente (835) est assez différente du paramètre d'épaississement (moyenne de 1 813), même à un niveau de un pour cent, et le PE varie relativement beaucoup (coefficient de variation de 0,32). Dans ce cas donc, le PE n'est pas une mesure appropriée du comportement, et un graphique du coefficient d'épaississement effectif sur le A/MS est nécessaire comme modèle ou pour faire des prévisions. De même, une équation d'épaississement, qui tient compte du fait que la ligne ne passe pas par l'origine, peut servir pour caractériser le comportement.

7.2.2 Sélection du polymère. Douze polymères ont été mis à l'essai sur une base de coûts égaux. Le Percol 728 et l'Hercofloc 849, en termes d'épaississement et de clarification, ont permis d'obtenir le meilleur comportement. D'autres tests effectués sur le Percol 728 et l'Hercofloc 849 ont démontré que le Percol 728 donnait un floc plus épais par rapport à toute la série de doses mises à l'essai, et, en général, un effluent de meilleure qualité.

7.2.3 Détermination de la dose optimale du polymère. Le tableau 31 présente les résultats de six tests effectués pour déterminer la dose optimale du polymère. Les concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent sont demeurées pratiquement constantes à des doses faibles du polymère, mais à la dose la plus élevée, 1,73 mg/g, il y a eu augmentation évidente de celles-ci. La concentration de matières solides flottantes a été obtenue avec une dose du polymère de 1,38 mg/g, et cette valeur a été choisie comme l'un des niveaux dans le plan factoriel des tests à l'usine pilote de la phase 3.

Les tests 3 et 4 ont été effectués, dans la mesure où cela a été possible, dans des conditions semblables afin de déterminer l'importance de l'erreur expérimentale. Les concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent étaient égales selon la précision des méthodes de détermination des concentrations de matières solides et les résultats sur les matières solides flottantes totales affichaient une différence de cinq pour cent. Pour cette série d'essais, avec diverses doses du polymère, la variation globale des résultats sur les matières solides flottantes totales n'était que de 12 pour cent; ainsi, les doses du polymère n'ont pas vraiment amélioré le comportement. Ces résultats diffèrent de ceux obtenus dans les études antérieures (Gehr et Henry, 1976) et dans la phase 1 où, bien que les concentrations des matières solides flottantes totales n'avaient pas été affectées, il y a eu une nette amélioration au niveau des concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent.

Malgré les résultats contradictoires susmentionnés, le polymère choisi a été le meilleur d'un groupe original de 12. Les essais de flottation en discontinu ont donné un effluent d'une qualité inférieure à celle obtenue dans les essais à l'usine pilote. De plus, les essais en discontinu n'indiquent pas s'il y a amélioration de la stabilité.

7.2.4 Effets de l'addition du $FeCl_3$. Le tableau 32 montre les effets entraînés par l'addition du $FeCl_3$ sur le comportement de la flottation sous pression et sur l'élimination du phosphore soluble. L'addition du $FeCl_3$ et du polymère a entraîné une nette réduction

TABLEAU 31 DÉTERMINATION DE LA DOSE OPTIMALE DU POLYMÈRE (PERCOL 728). TESTS EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU. PHASE 3

Test	Dose du polymère (mg/g)	Matières solides en suspension dans l'afluent (mg/L)	A/MS x 100	Matières solides flottantes totales (%)	PE	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Captation des matières solides* (%)	Réduction des matières solides** (%)
1	0	2645	2,79	6,68	1905	79 94	97	
2	0,84	2645	2,82	6,49	1833	88 93	97	
3	1,30	2560	2,89	6,32	1799	79 94	97	
4	1,30	2560	2,78	6,68	1978	83 93	97	
5	1,38	3203	2,19	7,21	2165	81 95	97	
6	1,73	3203	2,21	7,01	2086	113	93	96

Remarque:

$$\text{* Captation des matières solides} = \frac{\text{Matières solides totales en suspension (Affluent + liquide recirculé) - Matières solides en suspension dans l'effluent}}{\text{Matières solides totales en suspension (Affluent + liquide recirculé)}} \times 100$$

$$\text{**Réduction des matières solides} = \frac{\text{Matières solides en suspension dans l'affluent - Matières solides en suspension dans l'effluent}}{\text{Matières solides en suspension dans l'affluent}} \times 100$$

des matières solides en suspension dans l'effluent. Le comportement optimal, en termes de floc total et de concentration de matières solides en suspension dans l'effluent, a été obtenu avec une dose du polymère de 1,9 mg/g et une dose de $FeCl_3$ de 25 mg/L. Dans ce cas-ci, la qualité de l'effluent a été considérablement meilleure que dans le cas ou aucun polymère ou produit chimique n'avait été ajouté.

7.3 Fonctionnement de l'usine pilote

Le problème majeur qui s'est posé durant les tests à l'usine pilote a été l'élimination des matières solides flottantes. Ce problème ne s'est pas présenté durant les deux phases antérieures pour deux raisons: en général, on a supposé que les matières

TABLEAU 32 EFFET DE L'ADDITION DE $FeCL_3$. UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU - PHASE 3

Test	Dose du polymère (mg/g)	Dose de $FeCl_3$ (mg/L)	Affluent		A/MS x 100	Matières solides totales (%)	PE	Effluent		Captation des matières solides (%)	Réduction des matières solides (%)	Réduction du phosphore soluble (%)
			Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)				Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)			
1	0	0	2341	0,3	3,23	6,40	1783	67	0,3	94,0	97,1	0
2	0	25	2341	0,3	3,25	6,50	1798	40	0,2	96,5	98,3	33
3	1,9	25	2321	0,4	3,28	6,85	1895	26	0,3	97,6	98,9	25
4	1,9	15	2321	0,4	3,27	6,44	1786	34	0,3	96,9	98,5	25
5	1,7	35	2556	0,6	3,09	6,38	1700	32	0,1	97,4	98,7	88
6	1,7	45	2556	0,6	3,14	6,60	1731	39	0,1	96,8	98,5	88

solides flottantes dans la troisième phase était à un niveau plus profond que dans la phase 1 et celles-ci étaient certainement à un niveau plus profond que dans la phase 2; deuxièmement, l'usine pilote a fonctionné durant une période plus longue dans cette phase que dans la phase 1.

L'écumoire à fonctionnement continu était placé de telle façon que les lames ne raclaient pas la partie extrême du bassin (fin de l'effluent). Les ingénieurs ont probablement cru que les matières solides flottantes seraient enlevées de cet endroit par déplacement naturel ou par un effet de succion, ce qui s'est passé durant les deux phases antérieures. Cependant, les matières solides totales avaient tendance à s'accumuler dans la phase 3 et si elles n'avaient pas été enlevées manuellement, la qualité de l'effluent se serait détériorée. De plus, comme les matières solides totales étaient trop profondes pour pouvoir être enlevées manuellement avec une cuillère, la superficie effective disponible pour la flottation a été réduite d'environ 12 pour cent. En théorie, cette réduction aurait dû être reflétée dans les calculs de la charge superficielle, lesquels calculs n'ont pas été effectués car la réduction superficielle réelle était imprécise. L'effet réel serait que les charges hydrauliques et de matières solides seraient supérieures à celles calculées.

Pour résoudre ce problème, il faudrait installer une chicane inclinée ou verticale, selon celle qui convient, pour remonter le fond du bassin et permettre l'écumage de toute la surface. Afin de garder une uniformité, aucune modification n'a été apportée durant l'exécution des tests de la phase 3.

7.4 Résultats des tests à l'usine pilote

Les résultats des tests effectués à l'usine pilote durant la phase 3 ont été analysés du point de vue statistique, en se servant de l'analyse de la variance des résultats à partir du plan factoriel fractionnel seulement et en utilisant la méthode traditionnelle du graphique et de l'analyse de la forme des courbes. Toutes les données expérimentales pertinentes, c'est-à-dire celles provenant du groupe factoriel d'expériences de même que des expériences effectuées dans différentes conditions, peuvent être incorporées dans la deuxième méthode d'analyse.

7.4.1 Analyse du groupe d'expériences factoriel fractionnel. Lors d'expériences, il est généralement admis que les variables indépendantes auront des valeurs fixes durant la série répétée de tests et que chaque valeur sera en fait égale au niveau préalablement choisi. Dans cette étude, on a utilisé de la liqueur mixte provenant d'une usine d'épuration par boues activées et la concentration de matières solides en suspension dans la liqueur

mixte a naturellement varié. Les concentrations variaient de 2 116 à 3 130 mg/L, avec une moyenne de 2 830 et un écart type de 266 mg/L. Peu importe comment le fonctionnement de l'usine pilote de flottation sous pression a été contrôlé, tous les paramètres basés sur les concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent se sont écartés de leurs valeurs choisies. Dans le plan expérimental utilisé, la dose du polymère (mg/g) et le rapport A/MS étaient deux de ces paramètres et le tableau 45 montre la variation de ces variables "indépendantes". De plus, dans le cas des valeurs les plus élevées du débit de l'affluent et du rapport A/MS, celle du rapport A/MS n'a pu être atteinte à cause des limites du système de pressurisation et de recirculation et le niveau du rapport réel du A/MS qui a été mesuré se rapprochait de la valeur la plus faible. Les variations de ces deux variables indépendantes, la dose du polymère et le rapport A/MS, n'ont pu être prises en considération pour l'analyse statistique et, ainsi, le seuil de confiance sur lequel sont basés les énoncés de signification statistique est réduit.

Le plan de ces expériences était 1/2 répétition de 2^4, c'est-à-dire 2^{4-1}:

	Niveaux	
Variables indépendantes	Inférieure	Supérieure
Dose du produit chimique (mg/L)	0	25
Débit de l'affluent (L/min)	45	68
Dose du polymère (mg/g)	0,88	1,39
Rapport A/MS	0,028	0,041
Variables dépendantes		
Matières solides flottantes totales (%)		
Concentration de matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)		
Paramètre d'épaississement		

Les traitements ont été répétés trois fois dans huit séries, donnant ainsi 24 expériences. Pour obtenir plus de détails, se reporter à l'Annexe H.

L'Annexe I donne une analyse détaillée du plan factoriel fractionnel. Le tableau 33 présente les effets principaux et les interactions importantes.

TABLEAU 33 EFFETS ET INTERACTIONS IMPORTANTS, USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3

	Matières solides flottantes totales (%)		Concentration de matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)		PE	
	Dose du polymère faible	Dose du polymère élevée	Dose du polymère faible	Dose du polymère élevée	A/MS faible	A/MS élevé
Aucun produit chimique	6,64	6,79	65	28		
Avec du $FeCl_3$	6,13	7,53	36	18		
Débit faible					1674	1901
Débit élevé					2039	2528

Dose du polymère faible = 0,88 mg/g; dose du polymère élevée = 1,39 mg/g
A/MS faible = 0,028; A/MS élevé = 0,041
Dose de $FeCl_3$ = 25 mg/L
Débit faible = 45 L/min; débit élevé = 68 L/min

Ces effets et ces interactions peuvent être résumés ainsi:

a) Le polymère et le produit chimique agissent réciproquement pour produire une plus forte concentration de matières solides flottantes. Cependant, la présence du $FeCl_3$ avec une dose du polymère faible a un effet négatif sur la concentration des matières solides flottantes. Avec une dose du polymère élevée, le floc s'améliore légèrement, mais cette amélioration est très marquée lorsqu'il y a présence de $FeCl_3$.

b) Le polymère et le produit chimique agissent de façon indépendante pour améliorer la qualité de l'effluent. L'addition seule du produit chimique entraîne une réduction de la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent, peu importe la dose du polymère, et une dose élevée du polymère améliore la qualité de l'effluent, peu importe s'il y a présence du produit chimique ou non. Lorsque le produit chimique et une dose élevée du polymère sont ajoutés, la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent diminue encore plus.

c) Le A/MS et le débit affectent de façon indépendante le PE. Le PE augmente avec un rapport A/MS plus élevé et une vitesse de débit plus élevée, et le PE le plus élevé s'obtient avec la valeur la plus élevée de ces paramètres.

L'analyse du groupe d'expériences factoriel fractionnel a donné des résultats intéressants, certains inattendus. Cependant, les variances des variables indépendantes n'ont pas été prises en considération. À une vitesse d'écoulement faible, le rapport A/MS était raisonnablement uniforme, mais avait tendance à s'écarter de la valeur choisie au fur et à mesure que la vitesse d'écoulement du liquide recirculé augmentait.

Le résultat le plus intéressant de l'analyse a été l'interaction du produit chimique et du polymère sur la concentration de matières solides flottantes. Le $FeCl_3$ et le polymère agissent réciproquement pour produire le meilleur floc, mais la quantité du polymère doit être suffisante afin que le produit chimique puisse agir au maximum. Le principe de base de cette interaction n'est pas clair, pas plus que la raison pour laquelle la combinaison du produit chimique avec une quantité insuffisante du polymère est nuisible à la concentration des matières solides flottantes. L'explication doit se trouver dans le ou les mécanisme(s) de floculation (physique(s), électrique(s), chimique(s) ou une combinaison de ces trois), mais il est impossible de se pencher plus sur ce problème avec les données existantes.

L'effet du produit chimique et du polymère sur les matières solides dans l'effluent a été celui prévu et l'analyse statistique a démontré que chaque facteur agissait de façon indépendante pour produire cet effet, c'est-à-dire qu'il n'y a eu aucune interaction. Il est possible que les mécanismes de coagulation de chacun de ces facteurs soient différents et que les particules affectées par le produit chimique ne soient pas les mêmes que celles affectées par le polymère. Cette théorie est renforcée lorsqu'on compare les résultats de cette analyse avec l'analyse graphique (section 7.4.3).

L'augmentation du PE, qui se produisait au fur et à mesure que le A/MS augmentait, était contraire aux résultats obtenus dans les études précédentes (Gehr et Henry, 1976) mais conforme aux résultats de la présente étude (voir les sections 6.4.4, 7.2.1 et 7.4.3).

Le PE augmentait au fur et à mesure que le débit augmentait, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'amélioration au niveau de l'épaississement lorsque les débits sont élevés. Comme l'épaisseur de la zone des matières solides flottantes n'a pu être mesurée et, par conséquent, n'a pu être contrôlée avec précision, on pense que cela est attribué au fait

qu'un floc plus épais se développe lorsque le débit de l'affluent est plus élevé (charge de matières solides plus élevée). À condition qu'il n'y ait aucun primage de matières solides, la zone plus épaisse des matières solides flottantes entraînera une prolongation de la période de séjour du floc et une augmentation de l'épaisseur de la couche supérieure de cette zone. Il y aura une épaisseur optimale au-delà de laquelle il n'y aura aucune amélioration au niveau de l'épaississement; cette profondeur n'a pu être mesurée ni étudiée durant le projet.

La variation dans l'épaisseur de la zone des matières solides flottantes pourrait affecter considérablement l'interprétation de tous les résultats et de toutes les conclusions portant sur le comportement de l'épaississement dans cette phase de même que dans la phase 1. Une variable importante, l'épaisseur de cette zone, a été laissée de côté, ce qui expliquerait les nombreux cas où la régression s'est avérée médiocre et où une dispersion considérable des données a été observée. Cependant, durant tous les tests effectués dans chaque phase, le niveau d'eau est demeuré constant (les débits élevés n'ont eu que des effets mineurs); ainsi, l'épaisseur globale variable de cette zone n'aura pas un effet aussi important que si l'épaisseur du floc situé au-dessus du niveau d'eau avait changé de façon marquée (voir Bratby et Marais, 1975).

7.4.2 Analyse graphique des résultats. Le coefficient d'épaississement effectif par rapport au A/MS a été représenté sur un graphique pour les cinq cas où il y a eu addition du produit chimique et du polymère. Le tableau 34 résume l'analyse de la régression linéaire de ces graphiques, de même que le paramètre d'épaississement pertinent et la comparaison statistique des résultats. Les figures 23 et 24 représentent, sous forme de graphique, les cas I et III (tableau 34) respectivement. Le cas III comprend tous les tests au cours desquels le produit chimique a été ajouté; ensuite, la grande variété de doses du polymère. Ces tests ont été regroupés afin d'évaluer si l'addition seule du produit chimique, peu importe la dose du polymère, affecterait le comportement. L'effet de la dose variable du polymère sur l'épaississement a aussi été déterminé.

Les conclusions tirées de l'analyse de l'épaississement étaient:

1) Outre le cas II, pour lequel aucune explication n'est apparente, on a obtenu une corrélation linéaire acceptable pour toutes les conditions, et on peut assumer que cette méthode d'analyse des données est utilisable.
2) L'addition du polymère ou du produit chimique n'a pas eu un effet évident sur la pente et l'interception.

TABLEAU 34 ANALYSE DE L'ÉPAISSISSEMENT, COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3

Cas	Nombre de tests	Dose du polymère (mg/L)			$FeCl_3$ (mg/L)	Régression linéaire			PE		Pente à un seuil de 5%?
		Variation	Moyenne	σ		Pente	Interception	Coefficient	Moyenne	σ	
I	10	0,80-1,0	0,88	0,07	0	1490	12,7	0,90	1991	313	Non
II	7	0,80-1,0	0,93	0,07	25	440	51,9	0,21	1966	511	Non
III	16	0,42-1,67	1,10	0,38	25	1630	10,1	0,70	1942	425	Non
IV	8	1,35-1,60	1,46	0,05	0	1100	30,8	0,66	2067	463	Non
V	5	1,35-1,60	1,46	0,12	25	1140	34,3	0,85	2081	347	Non

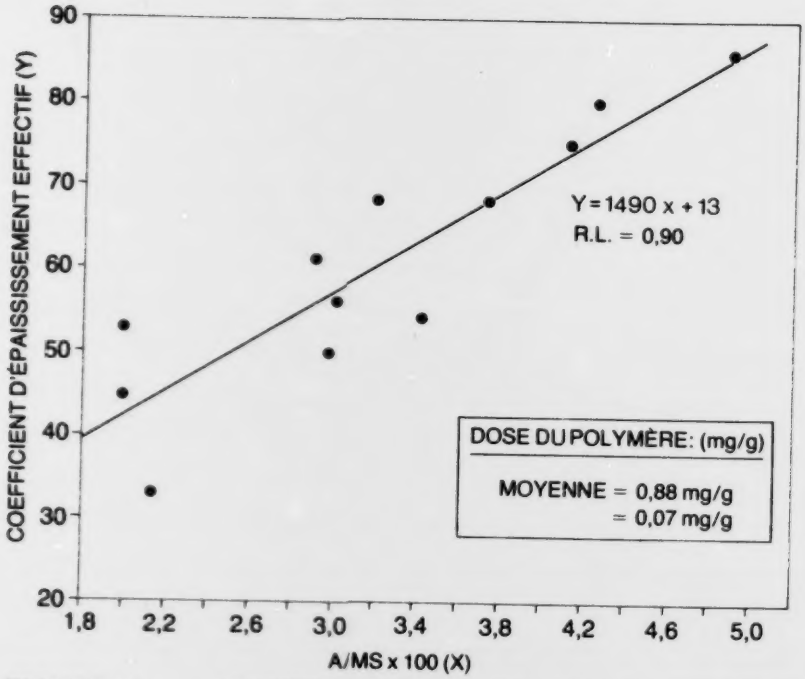


FIGURE 23 COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, SANS PRODUIT CHIMIQUE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3

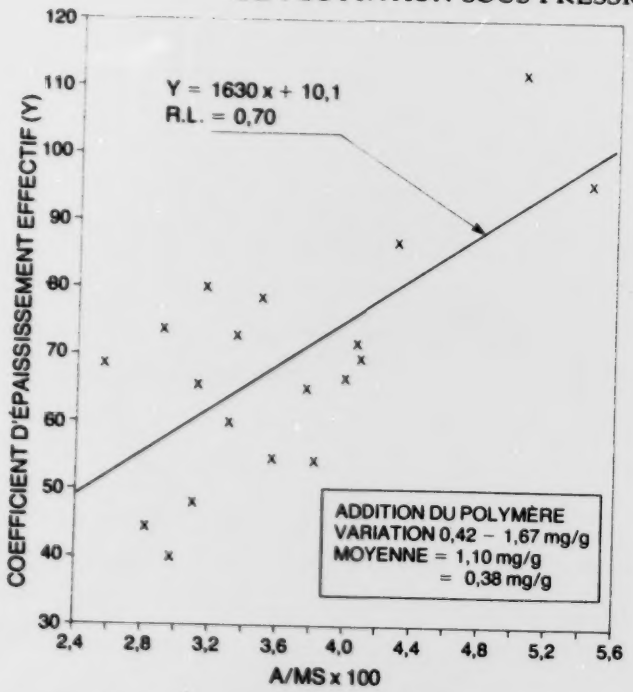


FIGURE 24 COEFFICIENT D'ÉPAISSISSEMENT EFFECTIF PAR RAPPORT AU A/MS, AVEC LE PRODUIT CHIMIQUE ET LE POLYMÈRE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3

3) Le cas III ne montre qu'une corrélation linéaire moyenne, même s'il contient le plus grand nombre d'échantillons parmi les cinq cas. Il semble que la variation des doses du polymère ait affecté le comportement de l'épaississement.

4) Le PE moyen augmente de cinq pour cent entre les tests effectués sans produit chimique et ceux effectués avec une quantité de 25 mg/L de produit chimique. Les cas I et IV (aucun produit chimique) et les cas II et V (avec le produit chimique) illustrent cette conclusion. L'effet est plus prononcé lorsqu'il y a présence du produit chimique.

5) Dans aucun cas la pente est égale au PE, selon le test statistique normalisé "t" et un seuil de signification de cinq pour cent. Par conséquent, il semble que le comportement, dans une condition de traitement particulière, soit mieux représenté par une équation d'épaississement que par un PE.

La signification et l'application du paramètre d'épaississement moyen (PE) et de l'équation d'épaississement moyenne exigent une explication. Le PE moyen est la moyenne de tous les PE dans une série de tests particuliers. Les valeurs individuelles du PE varient considérablement durant toutes les séries et durant l'application de rapports A/MS variés (tableau 34). Le PE a été mis au point de départ par Gehr et Henry (1976) dans le but a) d'éliminer la valeur de la concentration de matières solides en suspension dans l'affluent dans le nombre utilisé pour caractériser le comportement et b) d'avoir un nombre "utile" représentant le comportement de la flottation sous pression en termes d'épaississement seulement. On s'est aperçu que l'addition du polymère n'affectait pas le floc total; ainsi, le PE non plus n'a pas été affecté par l'addition du polymère. On a aussi suggéré que le PE demeurerait constant durant les variations pratiques du A/MS.

Les résultats des phases 1 et 2 de cette étude ont montré que le PE ne reste pas toujours constant lorsque le rapport A/MS varie et que, dans ces cas, une équation d'épaississement représentant la ligne du coefficient d'épaississement effectif sur le rapport A/MS était la meilleure façon de représenter et de prédire le comportement pour une série particulière de concentrations de matières solides en suspension dans l'affluent et l'addition d'air.

Dans la phase 3, le A/MS a varié dans chaque série de tests et comme le PE n'était pas constant ni égal à la pente du graphique approprié, il est clair que le PE ne serait pas modèle ou un paramètre d'épaississement adéquat pour vérifier les effets qu'entraîne la variation du A/MS. Cependant, le PE moyen peut servir d'indice de

comportement pour cette variation particulière des rapports A/MS. Ainsi, si l'addition du polymère a eu un effet marqué sur l'épaississement ou si d'autres changements devaient être apportés à l'usine et affectaient les matières solides flottantes totales, ceci ne refléterait pas un changement de la valeur du PE moyen déterminée pour un ensemble de rapports A/MS.

Le comportement d'un test à l'autre n'a pas été représenté adéquatement par un seul nombre, le PE. Il faudrait envisager une autre méthode comme l'équation d'épaississement. On peut cependant conclure que l'addition combinée du polymère et du produit chimique améliore le comportement de l'épaississement.

Comme dans l'analyse de l'épaississement, les matières solides flottantes totales par rapport au A/MS ont été représentées sur un graphique pour les cinq mêmes séries de conditions avec addition du produit chimique et du polymère. En général, les matières solides flottantes totales avaient tendance à être élevées lorsque le A/MS l'était, mais aucune corrélation linéaire n'était apparente et il a été impossible de distinguer les différences dans le comportement entre une série de conditions et une autre. On assume donc que, à l'intérieur des divers rapports A/MS utilisés, c'est-à-dire 0,0187 à 0,0545, il y aura peu ou pas de changements au niveau de la concentration des matières solides flottantes.

Les cinq séries de conditions ont été encore utilisées pour la représentation graphique de la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent par rapport au A/MS. Aucune tendance n'est apparue et on peut donc conclure que la variation du A/MS n'affectera pas la qualité de l'effluent.

La figure 25 représente l'effet du polymère sur les matières solides flottantes totales. Il est évident qu'il faut ajouter le produit chimique avant le polymère pour que ce dernier ait un effet sur la concentration des matières solides flottantes. De plus, lorsqu'on examine la figure 33b pour tout rapport A/MS particulier, on peut s'attendre à obtenir une zone de matières solides flottantes plus concentrée pour des débits plus élevés; la majorité des points représentant la valeur 68 L/min sont situés au-dessus de la ligne de régression, alors que la majorité des points représentant la valeur 45 L/min sont sous cette ligne.

Les graphiques représentant la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent par rapport au A/MS ont été réalisés pour un cas avec addition du produit chimique et pour un autre cas sans produit chimique (figures 26 et 27). On a identifié une série optimale de doses du polymère avec lesquelles ont été obtenues les concentrations

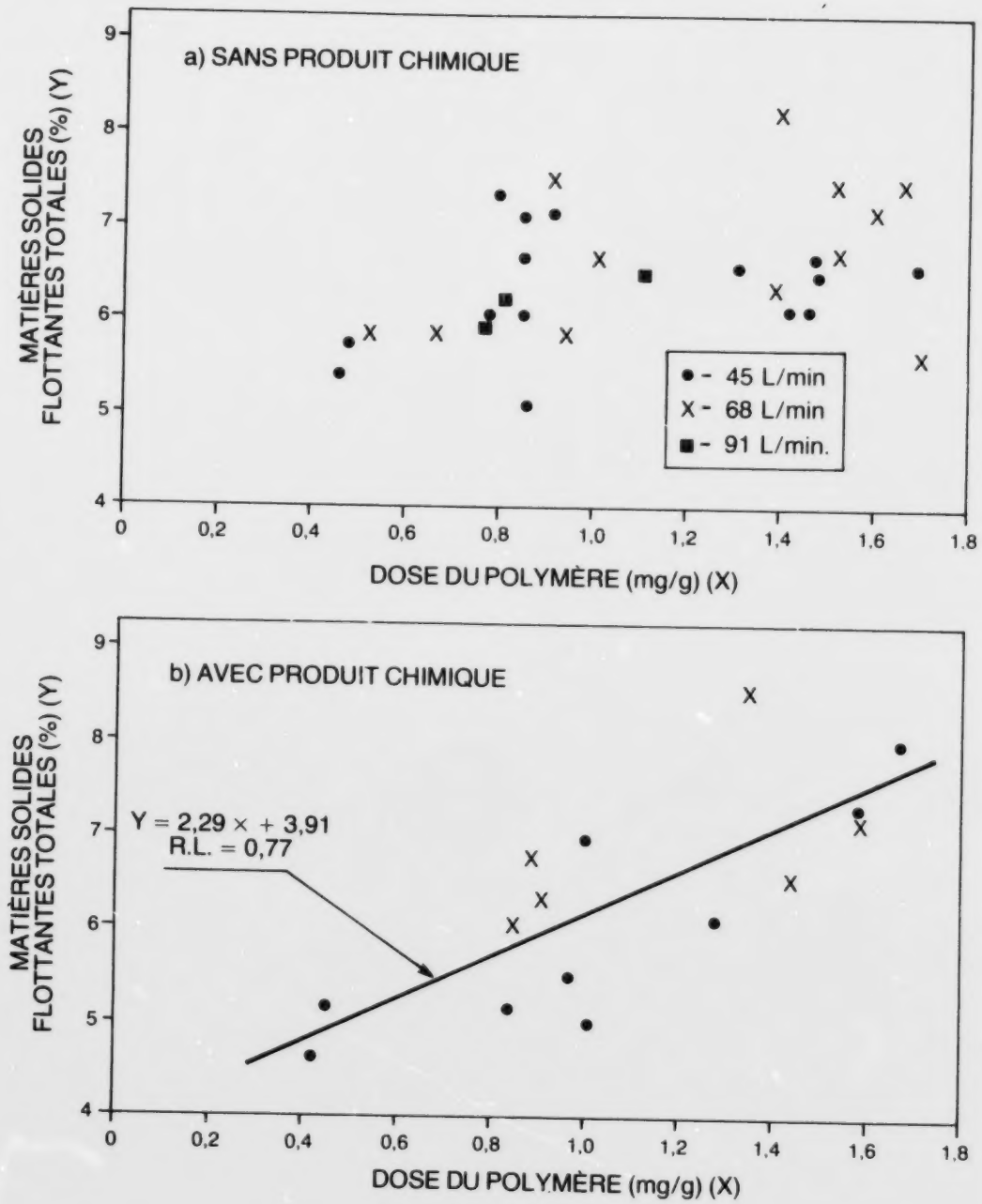


FIGURE 25 MATIÈRES SOLIDES FLOTTANTES PAR RAPPORT À LA DOSE DU POLYMÈRE POUR TOUT LES A/MS ET LES DÉBITS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3

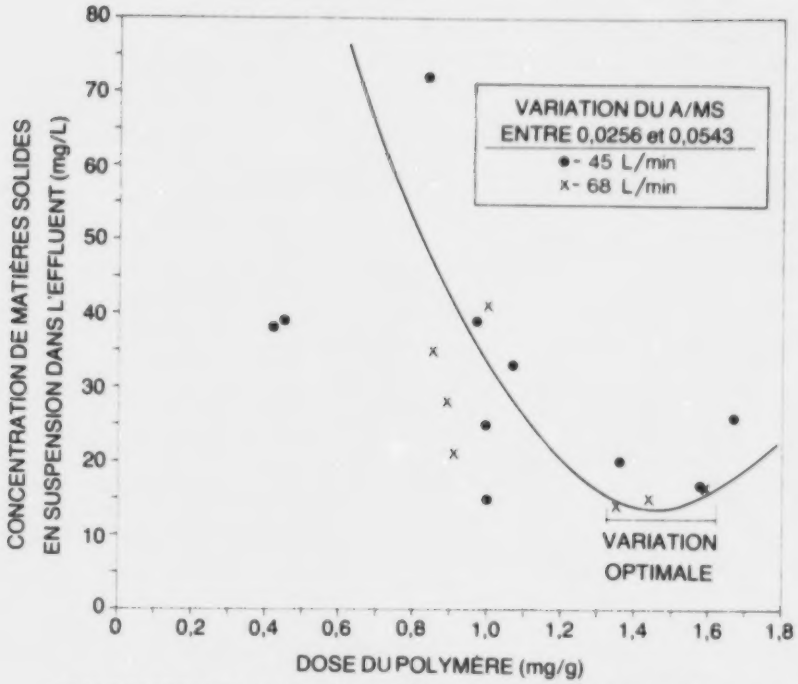


FIGURE 26 CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT À LA DOSE DU POLYMÈRE, AVEC LE PRODUIT CHIMIQUE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3

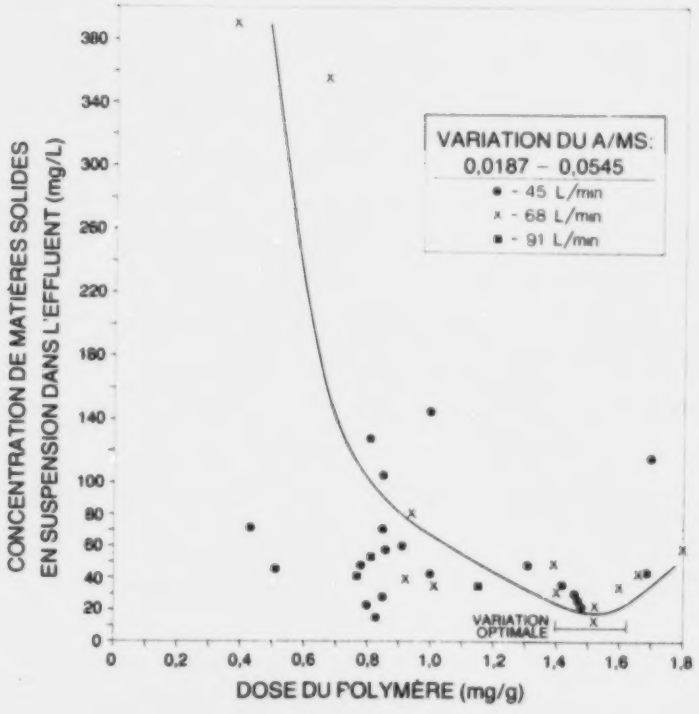


FIGURE 27 CONCENTRATION DE MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT PAR RAPPORT À LA DOSE DU POLYMÈRE, SANS PRODUIT CHIMIQUE, POUR TOUS LES A/MS. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3

de matières solides en suspension dans l'effluent les plus basses et les plus stables. Cette série était la même pour les deux graphiques, et variait entre 1,4 et 1,6 mg/g du polymère. Cependant, la qualité de l'effluent obtenue avec l'addition du produit chimique était supérieure; il a été possible d'obtenir une concentration de matières solides en suspension de 20 mg/L avec le produit chimique et de 15 mg/L sans celui-ci. Le débit de l'affluent n'a pas affecté la qualité de l'effluent. Il est clair que l'usine a été sous-chargée avec cette liqueur mixte particulière, même au débit le plus élevé de 91 L/min.

7.4.3 Comparaison de l'analyse statistique et graphique. La comparaison suivante des deux méthodes d'analyse est divisée d'une part en sections pour lesquelles les mêmes conclusions ont été tirées à partir des analyses, et d'autre part, en sections pour lesquelles les conclusions ont été tirées à partir d'une des deux analyses.

a) Conclusions tirées des analyses statistiques et graphiques:
   - i) Une concentration plus forte des matières solides flottantes est obtenue avec une dose du polymère élevée, et cette tendance est plus marquée lorsqu'il y a présence du produit chimique.
   - ii) Le rapoort A/MS n'affecte pas la concentration des matières solides flottantes (tendance peu visible sur le graphique; A/MS non significatif dans l'analyse statistique).
   - iii) Le rapport A/MS n'affecte pas la concentration des matières solides dans l'effluent (comme dans ii).
   - iv) Le polymère et le produit chimique améliorent de façon indépendante la qualité de l'effluent.
   - v) Le PE augmente lorsque le polymère et le produit chimique sont ajoutés en petites quantités.
   - vi) Les matières solides flottantes sont plus concentrées lorsque les débits sont élevés (la plupart des points représentant les débits élevés sont situés sous la ligne de régression dans le graphique des matières solides flottantes par rapport au polymère; le PE est élevé lorsque le débit est élevé).

b) Conclusions tirées de l'analyse statistique seulement:
   - i) Le polymère et le produit chimique agissent réciproquement sur la concentration de matières solides flottantes.
   - ii) Le débit et le A/MS affectent de façon indépendante le PE.

c) Conclusions tirées de l'analyse graphique seulement:

i) Une équation d'épaississement s'est avérée plus appropriée que le PE pour décrire le comportement de l'épaississement dans le cas où le A/MS était la seule variable.

ii) Il y a eu une dose optimale du polymère, destinée à obtenir une faible concentration de matières solides en suspension dans l'effluent, au-delà de laquelle la concentration augmente de nouveau. Le fait que la présence du produit chimique ait entraîné une amélioration au niveau de la concentration des matières solides en suspension dans l'effluent, bien que la dose du polymère n'ait pas changé et que même l'addition supplémentaire du polymère ait entraîné une augmentation de la concentration des matières solides en suspension dans l'effluent, montre bien que le polymère et le produit chimique agissent de différentes façons et (ou) qu'ils sont responsables de la floculation des particules de différentes grosseurs.

7.4.4 **Équilibre des matières solides.** Dans la plupart des tests 11 à 45, des mesures de l'équilibre des matières solides, faisant partie de la routine expérimentale, ont été effectuées. Les résultats sont présentés à l'Annexe J. Si on laisse de côté les erreurs extrêmes supérieures et inférieures, on peut dire que l'erreur moyenne n'était que de $\pm$ 1,6 pour cent. Ces résultats sont acceptables compte tenu de la nature des matériaux traités et mesurés. Les tests 17 et 26, qui affichaient des erreurs au niveau de l'équilibre des matières solides supérieures à 15 pour cent, ont été laissés de côté dans l'analyse statistique des expériences factorielles, car trois autres tests effectués dans des conditions semblables ont donné des résultats satisfaisants dans chaque cas.

À partir des données sur le fonctionnement de l'écumoire, on peut observer qu'une tentative a été faite pour lier l'élimination des matières flottantes avec la charge des matières solides afin de maintenir la zone des matières solides flottantes à une profondeur constante. Cependant, comme l'épaisseur de cette zone n'a pu être mesurée, ces réglages du fonctionnement ont été effectués, au mieux, de façon empirique, ce qui expliquerait pourquoi, dans certains cas, les erreurs au niveau de l'équilibre des matières solides étaient relativement élevées; la vitesse d'élimination des matières solides flottantes n'était pas égale à celle de l'admission des matières solides ou l'excédait, et l'épaisseur de la zone subissait un changement correspondant.

7.4.5 Comportement attendu. Le tableau 35 résume les conditions de fonctionnement recommandées et le comportement attendu dans des conditions données. Les résultats attendus sont les valeurs optimales obtenues à partir de l'analyse du plan factoriel fractionnel et sont jugées comme optimistes. Les conditions de fonctionnement mises en tableau s'appliquent dans le cas des valeurs optimales afférentes aux trois paramètres de comportement (c'est-à-dire la plus faible concentration de matières solides en suspension dans l'effluent, la concentration des matières solides flottantes les plus élevées et le PE le plus élevé). On n'a pas tenu compte des coûts en déterminant des conditions et ces résultats. Les calculs ultérieurs des coûts ont nécessité un rapport A/MS bas (et donc un rapport de recirculation) et les résultats n'ont pas été aussi favorables.

7.5 Mise à l'échelle

Le tableau 36 donne une comparaison du comportement avec l'unité en fonctionnement discontinu et celui avec l'unité en fonctionnement continu. En général, la comparaison est excellente. Contrairement aux deux phases antécédentes, peu de tests pilote en discontinu ont été effectués. Ceci pourrait expliquer partiellement sinon entièrement, les écarts que l'on retrouve dans les valeurs optimales du A/MS, la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent et l'effet de l'addition du $FeCl_3$.

Les différences dans les valeurs optimales du A/MS et dans les concentrations de matières solides en suspension dans l'effluent étaient d'environ 30 pour cent. Seuls six tests en discontinu ont été effectués pour obtenir le A/MS optimal et il n'y a eu aucune répétition. La différence de 30 pour cent n'est pas énorme, compte tenu des variables en cause et de la précision des mesures. L'effluent de qualité supérieure obtenu dans le test pilote est conforme aux résultats obtenus dans l'étude antérieure (Gehr et Henry, 1976) et dans les phases antécédentes. Cela est probablement dû à la turbulence moins importante et à une meilleure utilisation du polymère dans l'unité fonctionnant en continu.

L'effet du produit chimique sur le floc n'a pas clairement été indiqué dans les tests en discontinu. Cinq tests seulement ont été effectués avec du $FeCl_3$, nécessitant trois doses différentes de $FeCl_3$ et du polymère. Les résultats ont permis de voir qu'une addition de 25 mg/L du produit chimique permettait d'obtenir un comportement optimal de l'épaississement, mais les effets de l'interaction avec le polymère n'ont pu être déterminés.

TABLEAU 35 RÉSUMÉ RELATIF À LA FLOTTATION DE LA LIQUEUR MIXTE PROVENANT D'UNE USINE D'ÉPURATION ORDINAIRE PAR BOUES ACTIVÉES. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION - PHASE 3

Conditions de fonctionnement optimales	
Affluent	68 L/min
Concentration de matières solides en suspension dans l'affluent	2 900 mg/L
Polymère	1,45 mg/g
$FeCl_3$	25 mg/L
Saturation d'air	60%
A/MS	0,041
Charge hydraulique	4,88 m/h
Charge de matières solides	13,7 $kg/m^2 \cdot h$
Résultats attendus	
Concentration de matières solides en suspension dans l'effluent	18 mg/L
Matières solides flottantes totales	7,5%
PE	2 500

7.6 Facteurs économiques afférents à la flottation de la liqueur mixte provenant de l'usine d'épuration par boues activées

La flottation de la liqueur mixte (2 800 mg/L) provenant d'une usine d'épuration ordinaire par boues activées a produit une concentration de matières solides flottantes de 7 1/2 pour cent. Afin de comparer de façon réaliste le processus avec la décantation, laquelle a produit entre 1 et 1 1/2 pour cent de boue, il faut concentrer encore plus les boues de déchets activées provenant de la décantation. Comme la flottation sous pression est devenue une méthode acceptable pour cette fin, les coûts de l'épaississement par flottation ont été ajoutés aux coûts afférents au bassin de décantation.

TABLEAU 36 COMPARAISON DU COMPORTEMENT DE LA FLOTTATION SOUS PRESSION EN FONCTIONNEMENT DISCONTINU ET À L'USINE PILOTE - PHASE 3

	En discontinu	Pilote
Pression (kPa)	276	283-380
Rapport de recirculation optimal	2,0	2,5
A/MS optimal	0,028	0,041 (s)
Dose du polymère optimal (mg/g)	1,38	Environ 1,45 (g)
Dose de $FeCl_3$ (mg/L)	25	25
Effet du $FeCl_3$	1) A amélioré la qualité de l'effluent lorsqu'il n'y avait pas de polymère	1) A amélioré la qualité de l'effluent indépendamment de la concentration du polymère
	2) Autre amélioration de la qualité de l'effluent avec addition du polymère	2) Effet de l'interaction polymère/produit chimique sur les matières solides flottantes
	3) Aucun effet détectable sur les matières solides flottantes	
Matières solides flottantes totales optimales (%)	7,21	7,53 (s)
Concentration optimale de matières solides en suspension dans l'effluent avec polymère (mg/L)	26	18 (s)
PE optimal	2 165	2 500 (s)

Note: s = résultats de l'analyse statistique
g = résultats de l'analyse graphique

La taille de chaque unité a été déterminée à partir des charges hydrauliques, sauf dans le cas de l'épaississement par flottation où les charges de matières solides s'appliquent. L'Annexe K contient tous les critères modèles. Ceux utilisés dans cette section sont:

Opération	Charge moyenne	Facteur de charge de pointe
1. Flottation sous pression (liqueur mixte)	4,88 m/h*	1,3
2. Décantation/flottation		
a) Décantation terminale	0,82 m/h**	2
b) Flottation (boues activées)	9,8 kg/m^2•h***	2

* d'après les données de l'usine pilote de la phase 3
** pratique courante du ministère de l'Environnement de l'Ontario
*** recommandations du fabricant

Les coûts en capital afférents à la flottation de la liqueur mixte et à la décantation ont été évalués à partir des récents contrats de construction et des prix des fabricants pour l'équipement, mis à jour en octobre 1977. Les coûts d'énergie, les frais de main-d'oeuvre et les prix du polymère s'appliquent au sud de l'Ontario.

Le tableau 37 donne les coûts totaux afférents aux unités devant traiter 4 500, 45 500 et 227 000 m^3/j. Les coûts ne comprennent pas ceux afférents aux pompes d'alimentation ou d'effluent ni les autres frais.

TABLEAU 37 COMPARAISON DES COÛTS: BOUES ACTIVÉES

	Débit		
	4 500 m^3/j	45 500 m^3/j	227 000 m^3/j
Coûts en capital			
1. Flottation sous pression (liqueur mixte)	390 000$	2 978 000	11 000 000
2. Décantation/flottation			
a) Décantation terminale	134 000	1 025 000	4 500 000
b) Flottation (épaississement)	121 000	422 000	676 000
	225 000$	1 447 000	5 176 000
Exploitation et entretien			
1. Flottation (liqueur mixte)*	68 200	718 500	3 600 000
2. Décantation/flottation			
a) Décantation terminale	5 100	20 300	104 000
b) Flottation** (épaississement)	4 800	19 100	58 200
	9 900$	39 400	162 200

* Comprend les coûts pour le polymère

** Comprend les coûts pour le polymère et le $FeCl_3$

8 COMPARAISONS DES COMPORTEMENTS ET DES COÛTS

8.1 Dispositifs de flottation sous pression en fonctionnement discontinu et continu

La comparaison entre les dispositifs en fonctionnement discontinu et continu se limite aux paramètres non assujettis au temps. Ces paramètres sont la concentration de matières solides en suspension dans l'effluent, les matières solides flottantes totales et le PE ou l'EE, de même que les conditions d'exploitation portant sur la pression, le rapport de recirculation, le A/MS et la dose du polymère/produit chimique. Les charges de matières solides et hydrauliques et les effets de la surface et de l'épaisseur ne peuvent pas être comparés. La documentation contient souvent des références à la "vitesse ascensionnelle" (Eckenfelder et Ford, 1970; Turner, 1975; Wood et Dick, 1973) comme méthode utilisée pour introduire la notion de temps dans les analyses des tests en discontinu, mais à la suite d'une expérience antérieure (Gehr et Henry, 1976), ce facteur n'a pas été utilisé dans la présente étude.

Les tableaux 18, 29 et 36 donnent les résumés des comparaisons entre le comportement en fonctionnement discontinu et continu pour les phases 1, 2 et 3 respectivement. Dans chaque cas, on retrouve une comparaison des conditions nécessaires à l'obtention du comportement optimal. On y retrouve les points suivants:

a) La concentration optimale de matières solides en suspension dans l'effluent est toujours inférieure à celle obtenue à l'usine pilote.

b) Le rapport A/MS optimal nécessaire pour l'usine pilote est de 0 à 40 pour cent plus élevé que celui pour le dispositif en fonctionnement discontinu.

c) L'amélioration de la qualité de l'effluent obtenue à la suite de l'addition du polymère n'est pas aussi évidente dans le dispositif en fonctionnement discontinu que dans l'usine pilote. L'addition du polymère améliore la stabilité en fonctionnement continu, ce qui ne peut être mesuré dans un dispositif fonctionnant en discontinu. Le polymère utilisé à l'usine pilote a été choisi sur la base de la comparaison des tests effectués avec le dispositif fonctionnant en discontinu. À cause de restrictions de temps, cette sélection n'a pas été confirmée dans les tests à l'usine pilote. Les besoins en polymère du dispositif fonctionnant en discontinu reflètent ceux de l'usine pilote, sauf dans le cas de la phase 2 où le polymère a été utile pour stabiliser la qualité de l'effluent.

d) La pression utilisée à l'usine pilote était toujours supérieure (jusqu'à 50 pour cent supérieure selon la vitesse d'écoulement du liquide recirculé) à celle utilisée dans le dispositif fonctionnant en discontinu, car ce dernier avait une pression nominale maximale de 345 kPa. Cependant, on en a tenu compte dans les mesures de l'oxygène dissous. Les effets des tailles variantes des bulles d'air sous différentes pressions sont négligeables, comparativement aux autres erreurs expérimentales.

e) Dans les cas où il a été possible d'effectuer des mesures sur les matières solides (phase 1 et 3), la concentration des matières solides flottantes entre le dispositif fonctionnant en discontinu et l'usine pilote était comparable à 10 pour cent près.

f) Les effets du $FeCl_3$ sur le comportement de la flottation ont d'abord été étudiés dans les tests en discontinu. Dans la phase 1, la comparaison des comportements entre le dispositif fonctionnant en discontinu et l'unité pilote s'est avérée médiocre, probablement à cause de la qualité limitée de données. L'addition du $FeCl_3$ a eu des effets semblables dans les phases 2 et 3, mais l'importance de la réaction de l'unité fonctionnant en discontinu et celle de l'unité pilote a été différente dans chaque cas.

g) Dans les cas où le PE et (ou) la pente étaient comparables, notamment dans la phase 1, les différences entre les valeurs provenant de l'unité fonctionant en discontinu et celles de l'usine pilote étaient d'un ordre inférieure à 12 pour cent.

En résumé, le dispositif fonctionnant en discontinu a permis d'évaluer de façon approximative le comportement prévu à l'usine pilote dans des conditions de charge appropriées. Les besoins en air, la dose du polymère et le comportement en termes de concentrations de matières solides dans l'effluent et dans la zone des matières flottantes ont pu être prédits de façon assez précise. L'annexe E donne un exemple de l'utilisation des données provenant des tests en discontinu pour l'établissement du processus.

8.2 Comportement à l'usine pilote

Le tableau 38 donne un résumé du comportement à l'usine pilote. On y remarque les points suivants:

a) Les recommandations du fabricant, Komline-Sanderson, sont:
   - une charge hydraulique inférieure à 2,19 m/h;
   - une charge en matières solides inférieures à 9 $kg/m^2 \cdot h$.

   La charge hydraulique réelle (dominante) a excédé ces valeurs dans tous les cas. En fait, avec une concentration faible de matières solides en suspension dans l'affluent,

TABLEAU 38 RÉSUMÉ DU COMPORTEMENT À L'USINE PILOTE

	PHASE 1 (Aération prolongée)	PHASE 2 (Eaux d'égouts)	PHASE 3 (Épuration ordinaire par boues activées)	
Débit de l'affluent (L/min)	32	91	68	
Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	4 600	220	2 900	
Charge hydraulique (m/h)	2,27	6,50	4,88	
Charges des matières solides ($kg/m^2 \cdot h$)	10,4	1,44	13,7	
Saturation d'air (%)	60	52	60	
A/MS	0,028	0,30	0,026	(0,41)
Débit du liquide recirculé (L/min)	80	109	102	(170)
Rapport de recirculation	2,5	1,2	1,5	(2,5)
Dose du polymère (mg/g)	0,9	2,2	1,45	
Dose de $FeCl_3$ (mg/L)	0-60	0	25	
Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	< 15	40	18	
Matières solides flottantes totales (%)	3,8	5,7	6,5	(7,5)
PE	1 000	3 000	2 500	

Remarques: On suggère les paramètres ci-dessus comme modèle. Les valeurs entourées de paranthèses pour la phase 3 sont les valeurs les plus élevées déterminées de façon statistique et ne sont pas jugées économiques pour le modèle.

comme par exemple dans les eaux d'égouts, la charge hydraulique pouvait être d'au moins trois fois supérieure à celle recommandée. Il semble, d'après l'expérience limitée tirée de courts essais, que les charges hydrauliques peuvent être de 50 pour cent au moins supérieures aux valeurs recommandées, sans qu'il y ait détérioration du comportement de la flottation sous pression. Les valeurs faibles utilisées pour établir les capacités des dispositifs servent de marge de sécurité.

b) Du point de vue marginal, la saturation d'air était plus basse dans la phase 2 (eaux d'égouts) que dans les deux autres phases et n'a même pas atteint le niveau relativement inefficace de 60 pour cent.

c) Comme il est difficile de mettre en flocons les eaux d'égouts, la flottation nécessite environ 10 fois plus d'air par unité de masse que dans le cas des liqueurs provenant des usines d'épuration à aération prolongée et des usines d'épuration ordinaire par boues activées. Cette floculation médiocre se reflète aussi par une concentration plus élevée des matières solides dans l'effluent. Cependant, comme l'indique le paramètre d'épaississement, les eaux d'égouts brutes étaient, parmi les trois suspensions, les plus sensibles à l'épaississement par flottation.

d) La dose du polymère élevée indiquée pour les eaux d'égouts est celle requise pour obtenir un fonctionnement stable pour des concentrations variées de matières solides dans l'effluent. Avec une eau usée plus uniforme, il se peut qu'aucune dose du polymère ne soit nécessaire.

e) Bien que les matières solides flottantes totales dans la phase 1 étaient considérablement plus basses que celles dans les deux autres phases, il est probable qu'il aurait été possible d'augmenter cette concentration avec d'autres combinaisons de doses de $FeCl_3$ et de polymère. Les contraintes de temps ont empêché la réalisation d'autres expériences.

8.3 Comparaison des coûts

La flottation comme solution de rechange à la décantation pour séparer les matières solides dans la liqueur mixte ou les eaux d'égouts ne se justifie pas dans le traitement des déchets municipaux du point de vue des facteurs économiques. Le tableau 39 le montre bien.

Le tableau 39 montre que l'utilisation de la flottation à la place de la décantation augmente de 1 1/2 fois les coûts en capital et de 20 fois les coûts d'exploitation, selon l'application et la capacité de l'usine.

TABLEAU 39 COMPARAISON DES COÛTS: FLOTTATION C. DÉCANTATION

Traitement	Coûts en capital et d'exploitation (x 1 000$)					
	4 500 m^3/j		45 500 m^3/j		227 000 m^3/j	
	CAP.	EX.	CAP.	EX.	CAP.	EX.
1) Flottation de la liqueur mixte par aération prolongée	670	70	5 484	587	22 680	3 310
Décantation terminale* Épaississement par flottation	293	11	1 735	47	6 428	177
2) Flottation des eaux d'égouts	390	26	2 437	207	9 330	1 031
Décantation primaire	125	7	965	46	4 260	213
3) Flottation de la liqueur mixte par aération prolongée	390	68	2 978	719	11 000	3 600
Décantation terminale* Épaississement par flottation	255	10	1 447	39	5 176	162

REMERCIEMENTS

La préparation de ce rapport a été rendue possible grâce à la coopération de nombre de personnes et d'entreprises que nous tenons à remercier beaucoup pour leur aide.

M. W.E. Stepko et M. D.G. Green de la Société canadienne d'hypothèques et de logement, avec qui tous les arrangements contractuels ont été faits.

Le Dr D.B. Cohen, le Dr A. Netzer, le Dr N.W. Schmidtke et le Dr M.F. Hamoda du Centre technique des eaux usées (WTC) d'Environnement Canada, qui ont participé à divers moments à la direction et à la coordination des travaux.

M. H. Campbell, agent de liaison scientifique pour le projet qui a contribué par ses nombreuses suggestions à la réalisation du projet.

M. R.E. Mills et son personnel de la Section des services aux installations du Centre technique des eaux usées; Ron Gillepsie et Eric Luxon en particulier pour les efforts considérables qu'ils ont fournis pour entretenir et exploiter l'usine pilote.

M. K. Conn et son personnel de la Section des services aux laboratoires du Centre technique des eaux usées, pour leur aide apportée au niveau des nombreuses analyses à effectuer.

M. W. Burns, assistant technique, de l'université de Toronto, pour l'apport inestimable d'efforts et d'expérience pratique pour la mise en marche, la vérification et l'entretien de l'équipement.

Le professeur J.G. Templeton du département du génie industriel de l'université de Toronto, pour son aide apportée durant l'analyse statistique des données.

Les fabricants d'équipements de flottation sous pression et leurs représentants, Komline-Sanderson, Hugh R. Fielding Limited, Rexnord Canada Limited, Envirotech Canada Limited, Ingersoll Rand Company, Permutit Corporation, Imperial Chemical Industries Limited, qui ont fourni les renseignements, les coûts et les critères modèles afférents à leur équipement.

Les ingénieurs-consultants R.V. Anderson Associates Limited et James F. MacLaren Limited pour les renseignements sur les coûts en construction.

BIBLIOGRAPHIE

Albert, J.T., "Waste Activated Sludge Thickening by Countercurrent Flotation", document présenté au 32nd Annual Purdue Industrial Waste Conference, Lafayette, Indiana, mai 1977.

Ashman, P.S., "Operational Experiences of Activated Sludge Thickening by Dissolved Air Flotation at the Aycliffe Sewage Treatment Works", document présenté au Flotation for Water and Waste Treatment Conference, Water Research Centre, Felixstowe, Angleterre juin 1976.

Barrett, F., "Electroflotation - Development and Application", Water Pollution Control 74(1):59-62, 1975. (Anglais)

Baum, R.A., and Hurst, G.E., "Treatment of Municipal and Industrial Wastes by Flotation", Proc. 8th Ind. Waste Conf., Université Purdue, p. 10, 1953.

Bratby, J. and Marais, G.V.R., "Saturator Performance in Dissolved-Air (Pressure) Flotation", Water Research 9(11):929-936, 1975.

Bridle, T.R., et al., "Start-Up of a Full-Scale Nitrification/Denitrification Treatment Plant for Industrial Waste". Proc. 31st Annual Purdue Industrial Waste Conference, p. 807, mai 1976.

Brown, B.R., et al., "Experiments on the Dewatering of Digested and Activated Sludge", Wat. Poll. Control 71(1):61-84, 1972. (Anglais)

Burfitt, M.L., "The Performance of Full-Scale Sludge Flotation Plant", Wat. Pollut. Control 71(4):474, 1975. (Anglais)

Campbell, H.W., and Le Clair, B.P., "Effects of Control Variables and Sludge Characteristics on the Performance of Dewatering and Thickening Devices", document présenté au Sludge Handling and Disposal Seminar, Toronto, Ontario, septembre 1974. Canada-Ontario Agreement on Great Lakes Water Quality, Conference Proceedings No. 2.

Campbell, H.W., et al., "Some Aspects of Chemical Sludge Thickening and Dewatering", document présenté au Alternatives for Nutrient Control Seminar, Environnement Canada, Kelowna, B.C., octobre 1975.

Campbell, H.W., et al., "Sludge Dewatering Design Manual", Canada-Ontario Agreement on Great Lakes Water Quality Project No. 75-3-22, Rapport de recherches No. 72, Ottawa, 1978.

Chambers, D.B., and Cottrell, W.R.T., "Flotation: Two Fresh Ways to Treat Effluents", Chemical Engineering, 83(16):95, 2 août 1976.

Chase, E.S., "Flotation Treatment of Sewage and Industrial Wastes", Sew. and Ind. Wastes 30(6):783, 1958.

Climenhage, D.C. and Stelzig, A., "Biological Process for Nitrogen - B.O.D. Removal at Maitland Works, Dupont of Canada, Ltd.", Proc. 20th Ont. Ind. Waste Conf., ministère de l'Environnement de l'Ontario, Toronto, juin 1973.

Collins, R. and Burns, C., "Full Scale Operating Tests Prove Sewage Plant Operates as Designed", Eng. New Record 146(16):42, 19 avril 1951.

Davies, O.L. (ed.), The Design and Analysis of Industrial Experiments, 2nd Ed., Hafner Pub. Co., N.Y., 1956.

Davis, C., Johannesburg City Engineer's Department. Communication personnelle, juillet 1977. (Afrique du Sud).

Dick, R.I., "Sludge Treatment", in Physicochemical Processes for Water Quality Control. W.J. Weber Jr.(ed), Chap. 12, pp. 559-563. Wiley-Interscience, 1972.

Eckenfelder, W.W., Jr. and Ford, D.L., Water Pollution Control, Jenkins Book Publishing Co., Austin and New York, Chapter 5, 1970.

Eckenfelder, W.W., Jr., et al., "Studies on Dissolved Air Flotation of Biological Sludges", In Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, Vol. 2, J. McCabe and W.W. Eckenfelder, Jr.(ed.), pp. 251-259, Reinhold, 1958.

Eliassen, R. and Schulhoff, H.B., "Grease Removal by Vaccum Flotation", Sew. Works Jour. 16(2):287, 1944.

Ettelt, G.A., "Activated Sludge Thickening by Dissolved Air Flottation", Proc. 19th Ind. Waste Conf., Université Purdue. Ext. Ser. 117:1, 210-244, 1964.

Ettelt, G.A., and Kennedy, T.J., "Research and Operational Experience in Sludge Dewatering at Chicago", Jour. W.P.C.F., 38(2):248, 1966.

Gehr, R. and Henry, J.G., "Laboratory Techniques for Evaluating Batch Flotation of Activated Sludge", Wat. Poll. Res. in Canada, 11, 19-33, 1976.

Gehr, R. and Henry, J.G., "Measuring and Predicting Flotation Performance", Jour. WPCF, 50(2):203-215, 1978.

Gupta, M.K. and Agnew, R.W., "Two Wisconsin Cities Treat Combined Sewer Overflows", Wat. and Sew. Works, 120(8):49, août 1973.

Hansen, C.A., and Gotaas, H.B., "Sewage Treatment by Flotation", Sewage Works Journal 15(2):242, 1943.

Hay, T.T., "Air Flotation Studies of Sanitary Sewage", Sew. and Ind. Wastes, 28(1):100, 1956.

Hemming, M.L., et al., "Experiences in the Treatment of Domestic Sewage by the Microflotation Process", document présenté à la Flotation for Water and Waste Treatment Conference, Water Research Centre, Felixstowe, Angleterre, juin 1976.

Hopper, S.H. and McCowen, M.C., "A Flotation Process for Water Purification". Jour. AWWA, 4(8):719-726, août 1952.

Howe, R.H.L., "A Mathematical Interpretation of Flotation for Solids-Liquid Separation", in Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, Vol. 2, J. McCabe and W.W. Echenfelder Jr.(ed.), pp. 241-250, Reinhold, 1958.

Huether, R., "Primary Treatment of Raw Sewage by Dissolved Air Flotation", document préparé pour le Centre technique des eaux usées, Environnement Canada, Burlington, Ont., et Univ. of Western Ontario, décembre 1974.

Hyde, R.A., et al., "Water Clarification by Flotation", Jour. AWWA, 69(7):369-374, juillet 1977.

Jank, B.E., et al., "Activated Sludge Treatment of Airport Wastewater Containing Aircraft De-Icing Fluids", Wat. Res., 8, 875-880, 1974.

Jones, W.H. "Sizing and Application of D.A.F. Thickeners", Wat. and Sew. Works, Ref. no. PR177, nov. 1968.

Kalinske, A.A., "Flotation in Waste Treatment", In: Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, Vol. 2, J. McCabe and W.W. Eckenfelder Jr. (ed.), pp. 222-231 Reinhold, 1958.

Kalinske, A.A. and Evans, R.R., "Comparison of Flotation and Sedimentation in Treatment of Industrial Wastes", Proc. 8th Ind. Waste Conf. Purdue Univ., 1953.

Katz, W.J., "Operators Forum", Jour. W.P.C.F. 36(4):407-416, avril 1963.

Katz, W.J. and Geinopolos, A., "Sludge Thickening by Dissolved Air Flotation", Jour. W.P.C.F. 39(6):946-957, 1967.

Kemp, G., Komline-Sanderson Ltd., communication personnelle, 1976.

Knapton, R.C. and Taylor, A.R., "New Flotation System Really Cuts Solids", Water and Wastes Eng. 12, 8, 1975.

Komline, T.R., "Sludge Thickening by Dissolved Air Flotation in the U.S.A.", document présenté au Flotation for Water and Waste Treatment Conference, WRC, Felixstowe, Angleterre, juin 1976.

Kormanik, R.K., "Factors Influencing Batch Flotation Tests - Discussion", Jour. W.P.C.F. 46(8) 2056, 1974.

Laboon, J.F., "Experimental Studies on the Concentration of Raw Sewage", Sew. and Ind. Wastes 24(4):423, 1952.

Leininger, K.V. and Wall, D.J., "Available Air Measurements Applied to Flotation Thickener Evaluations", Deeds and Data, W.P.C.F. 11(5), mai 1974.

Levy, R.L., et al., "Treatment of Combined and Raw Sewages with the Dissolved Air Process", Water Reseach 6, 1487-1500, 1972.

McMichael, W.F., "Cost of Dissolved Air Flotation Thickening of Waste Activated Sludge at Municipal Sewage Treatment Plants", Nat. Env. Res. Centre, février 1974, distributed by Nat. Tech. Inf. Ser. U.S. Dept. of Commerce, PB 226-582.

Mennel, M., et al., "Treatment of Primary Effluent by Lime Precipitation and Dissolved Air Flotation", Jour. W.P.C.F. 46(11):2471-2485, 1974.

Mulbarger, M.C. and Huffman, D.D., "Mixed Liquor Solids Separation by Flotation", Jour. San. Eng. Div. ASCE 96, SA4, 861, août 1970.

Parsons, W.A., "Activated Sludge Effluent Polishing", Proc. 32nd Annual Ind. Waste Conf., Univ. Purdue, p. 24, mai 1977.

Rich, L.F., Unit Operations of Sanitary Engineering. Wiley & Sons, Inc. (1961). Chap. 5: Flotation and Aerosol Separation.

Sandbank, E., "Improved Electroflotation for the Removal of Suspended Solids from Algal Pond Effluents", Water Research 8:587-592, 1974.

Snider, I.F., Jr., "Algae Removal by Air Flotation", document présenté au Ponds as a Wastewater Treatment Alternative Conference, Centre for Research in Water Resources, Université du Texas, Austin, 22-24 juillet 1975.

Speece, R.E., et al., "Application of a Low Energy Pressurized Gas Transfer System to Dissolved Air Flotation and Oxygen Transfer", Proc. 30th Purdue Industrial Waste Conference, p. 465, mai 1975.

Stander, G.J. and van Vuuren, L.R.J., "Flotation of Sewage and Waste Solids", in Water Quality Improvement by Physical and Chemical Processes, Water Resources Symposium No. 3, Université du Texas Press, E.F. Gloyna and W.W. Eckenfelder, Jr. (ed.), p. 190, 1970.

Turner, M.T., "The Use of Dissolved Air Flotation for the Thickening of Waste Activated Sludge", Effl. and Wat. Treat. Jour., 15(5): mai 1975. (Anglais)

U.S. Environmental Protection Agency, "Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal", EPA 625/1-74-006, 1974.

Valiquette, Y., "Dissolved Air Flotation for Woodroom Effluent Treatment", Pulp and Paper Canada, 77(3):71-74, mars 1976.

Van Vuuren, L.R.J. et al., "Dispersed Air Flocculation/Flotation of Organic Pollutants from Effluents", Water Research 2:177-183, 1968.

Vrablik, E.R., "An Evaluation of Circular Gravity-Type Separation and Dissolved-Air Flotation for Treating Oil Refinery Waste Water", Proc. 12th Ind. Waste Conf., Université de Purdue, p. 73, 1957.

Vrablik, E.R., "Fundamental Principles of Dissolved-Air Flotation of Industrial Wastes", Proc. 14th Ind. Waste Conf., Université de Purdue, 743, 1959.

Walzer, J.G., "Dissolved Air Flotation in the Waste Activated Sludge Process", The Permutit Company, Inc., octobre 1975.

White, R.L. and Cole, T.G., "Dissolved Air Flotation for Combined Sewer Overflows", Public Works, 104(2):50-54, février 1973.

Wood, R.F., "The Effect of Sludge Characteristics Upon the Flotation of Bulked Activated Sludge", Unv. of Illinois at Urbana-Champaign, Ph.D. Thesis, 1970. University Microfilms, 71-15, 003.

Wood, R.F. and Dick R.I., "Factors Influencing Batch Flotation Tests", Jour. W.P.C.F. 45(2):304-315, 1973.

Wood, R.F., and Dick, R.I., "Some Effects of Sludge Characteristics on Dissolved Air Flotation", document présenté au 7th Int. Conf. on Wat. Poll. Res., Paris, septembre 1974.

Zabel, T.F. and Rees, A.J., "The W.R.C. Flotation Working Group's 2300 m^3/day Pilot Plants", document présenté à la Flotation for Water and Waste Treatment Conference, Water Research Centre, Felixstowe, Angleterre, juin 1976.

ANNEXE A

SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

ANNEXE A SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Liste des symboles et des abréviations non couramment utilisés

A/MS	rapport air/matières solides
abs	absolu
atm	atmosphère
EOBA	épuration ordinaire par boues activées
FSP	flottation sous pression
AP	aération prolongée
Coef. d'EE	coefficient d'épaississement effectif = Matières solides flottantes totales (mg/L) / Matières solides totales (mg)/volume total (L)
MO/M	rapport matières organiques/micro-organismes ($jour^{-1}$)
H_0:	l'hypothèse de zéro est...
Aff.	affluent
R.L.	régression linéaire
MSSLM	matières solides en suspension dans la liqueur mixte (mg/L)
EE	eaux d'égouts
P sol.	phosphore soluble (mg/L)
EPE	paramètre d'épaississement = $\frac{\text{Coef. E}}{\text{A/MS}}$
MST	matières solides totales (%)
σ	écart type

ANNEXE B

MESURES DE L'AIR DISSOUS

ANNEXE B MESURES DE L'AIR DISSOUS

B.1 Méthode en fonctionnement discontinu pour déterminer le pourcentage de saturation d'air dans le liquide recirculé soumis à la flottation sous pression (d'après Komline-Sanderson)

La marche à suivre ci-dessous est recommandée pour déterminer le volume d'air dissous contenu dans le liquide du bassin de séjour de l'unité de flottation sous pression (voir la figure B1).

Liste de l'équipement:

1 - becher de 4 000 mL
1 - cylindre gradué de 500 mL
1 - petite soupape
1-m - long tube en plastique
1 - thermomètre
1 - baromètre

Le cylindre gradué de 500 ml offre un volume assez important pour pouvoir effectuer des relevés du volume d'air relâché avec une marge d'erreur de 2 ml.

Marche à suivre:

1) Laisser le dispositif de flottation sous pression atteindre un mode de fonctionnement stable.
2) Remplir à ras bord le cylindre gradué et verser 2 L d'eau dans le becher.
3) Renverser le cylindre en plaçant la paume de la main sur le bec pour empêcher l'eau de couler et le placer dans le becher partiellement rempli. En retirant la main, un vide se formera au-dessus de l'eau contenue dans le cylindre gradué.
4) Indiquer le niveau d'eau dans le becher par la lettre B.
5) Ajouter exactement 1 L d'eau dans le becher et indiquer ce deuxième niveau d'eau par la lettre A.
6) Enlever l'eau dans le becher jusqu'au niveau B en prenant soin de ne pas laisser entrer d'air dans le cylindre.
7) Inscrire le volume occupé par le vide dans le cylindre.
8) Inscrire toutes les conditions de fonctionnement pertinentes comme la température, la pression (atmosphérique et celle du bassin de séjour) et les débits.

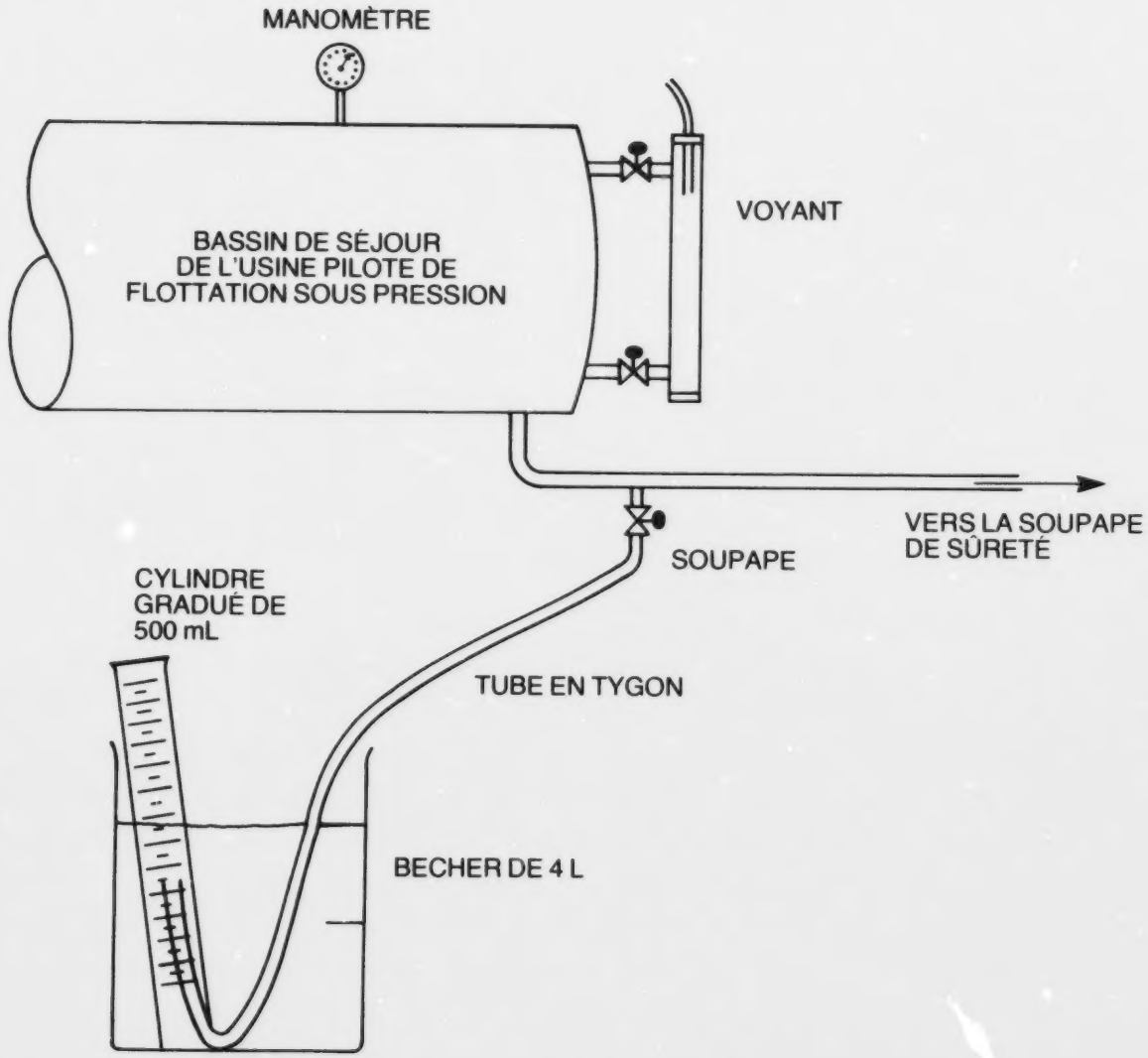


FIGURE B1 DISPOSITION DE L'ÉQUIPEMENT POUR MESURER L'AIR DISSOUS DANS L'USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION (méthode en fonctionnement discontinu)

9) Ouvrir légèrement la soupape et laisser l'eau saturée d'air pénétrer dans le cylindre comme dans la figure B1. Le débit doit être assez faible afin qu'aucune bulle d'air ne s'échappe de la partie inférieure du cylindre.

10) Fermer la soupape dès que le niveau d'eau atteint la marque A.

11) Lorsque toutes les bulles d'air se sont échappées de la solution et que le liquide contenu dans le cylindre est de nouveau clair, inscrire le volume d'air contenu dans la partie supérieure du cylindre gradué.

Calcul:

$$\text{Pourcentage de saturation} = \frac{V_r \times 100}{V_s}$$

où: V_r = volume d'air relâché à 21°C par L d'eau mise sous pression (mL)

$$= \frac{1\,000\,V_e}{1\,000 - V_e} \times \frac{294}{t + 273} \times \frac{P}{760}$$

V_e = volume d'air emprisonné dans le cylindre gradué (mL)

t = température du liquide (°C)

p = pression atmosphérique (mm Hg)

V_s = volume d'air à 21° C qui peut s'échapper à la pression atmosphérique d'un L d'eau saturée d'air lorsque le bassin de séjour est à sa température de fonctionnement.

$$= V_{760} \times \frac{P}{760} \times \frac{294}{t + 273} \times P$$

V_{760} = solubilité de l'air à l'atmosphère (voir le tableau B1)

P = pression dans le bassin de séjour (atm.)

TABLEAU B1 SOLUBILITÉ DE L'AIR DANS L'EAU

	Température (°C)											
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Volume d'air humide dissous (mL/L)	22,84	22,34	21,87	21,41	20,97	20,55	20,14	19,75	19,38	19,02	18,68	18,34

B.2 Méthode à l'aide de l'indicateur d'oxygène dissous pour déterminer le pourcentage de saturation d'air dans le liquide recirculé soumis à la flottation sous pression

Équipement:

Un indicateur d'oxygène Beckman Model 7002 a été utilisé dans la détermination routinière du pourcentage de saturation d'air dans le liquide recirculé. Ce compteur possède les caractéristiques suivantes permettant de l'utiliser dans des conditions expérimentales:

1) L'oxygène dissous est mesuré en termes de poids.
2) Il existe une compensation des températures entre 0 et 45° C.
3) Jusqu'à 345 kPa, on obtient une régularisation de la pression.
4) L'orientation de la sonde n'affecte pas la précision des relevés.
5) La sonde peut être soumise à une pression dans un bassin de séjour.
6) On obtient des relevés avec une marge d'erreur de plus ou moins un pour cent pour toutes les variations.

Le compteur a été modifié afin de pouvoir faire des relevés compris entre 0 et 40 mg/L de O_2.

Marche à suivre:

Un relevé de l'oxygène dissous a simplement été effectué en branchant le compteur et en laissant une partie du liquide recirculé s'écouler par la ligne de dérivation. Le relevé a été effectué après 15 minutes, et la ligne de dérivation a été fermée afin d'éviter que la membrane de la sonde ne s'endommage.

Calculs:

L'effet de la variation de la pression barométrique a été laissé de côté. Cette variation inférieure à plus ou moins 10 mm Hg pour 760 mm Hg donnerait une erreur inférieure à deux pour cent. Une autre hypothèse voulait que le pourcentage de saturation d'oxygène ait été égal au pourcentage de saturation d'air.

$$\text{Ainsi, le pourcentage de saturation} = \frac{O_1}{O_2} \times 100$$

où: O_1 = relevé de l'indicateur d'oxygène dissous (mg/L)

O_2 = l'oxygène saturé en théorie dans le bassin de séjour sous pression (mg/L)

$= O_{atm} \times P_{abs}$

O_{atm} = l'oxygène dissous à la pression atmosphérique, d'après le tableau B2.

P_{abs} = pression absolue dans le bassin de séjour (atm)

Deux tests ont été effectués durant la phase 1 de cette étude (flottation de la liqueur mixte soumise à l'aération prolongée) afin de comparer les valeurs du pourcentage de saturation d'air obtenues à l'aide des deux méthodes susmentionnées. Le tableau B3 donne les résultats de ces tests.

Ainsi, les deux méthodes ont donné des résultats semblables. La méthode avec l'indicateur d'oxygène dissous est évidemment supérieure à la méthode en fonctionnement discontinu, car dans cette dernière, quelques bulles d'air s'échappent inévitablement lors du renversement du cylindre gradué. Cependant, les résultats indiquent de façon probante que le pourcentage de saturation est assez inférieur à la valeur de 90 pour cent données par le fabricant. Les valeurs portant sur la saturation dans le tableau B3, c'est-à-dire environ 65 pour cent ou moins, ont été relevées de façon uniforme durant toute l'étude.

TABLEAU B2 SOLUBILITÉ DE L'OXYGÈNE, DE L'AZOTE ET DE L'AIR DANS L'EAU

	Température (°C)														
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
O_2 (mg/L)	11,3	11,1	10,8	10,6	10,4	10,2	10,0	9,7	9,5	9,4	9,2	9,0	8,8	8,7	8,5
N_2 (mg/L)	18,9	18,5	18,0	17,6	17,2	16,8	16,4	16,2	15,9	15,6	15,4	15,1	14,9	14,7	14,5
Air (mg/L)	30,2	29,6	28,8	28,7	27,5	27,0	26,4	25,9	25,4	25,0	24,6	24,1	23,7	23,4	23,0

TABLEAU B3 POURCENTAGE DE SATURATION D'AIR, USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE I

Test	Temp. (°C)	Pression dans le bassin de séjour (kPa)	Pourcentage de saturation	
			Méthode en fonctionnement discontinu	Méthode avec l'indicateur d'oxygène dissous
1	16	386	55	65
2	16	386	62	66

ANNEXE C

RÉSUMÉ DES ÉTUDES EFFECTUÉES AVEC LE TRACEUR

TABLEAU C1 RÉSUMÉ DES ÉTUDES FAITES AVEC LE TRACEUR, USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION

Test	Superficie du bassin (m^2)	Débit d'entrée (L/min)	Débit du liquide recirculé (L/min)	Temps de la crête du court-circuitage (min)	Temps de la crête principale	Temps de la crête théorique (min) (pour écoulement en bloc)	Rapport	Concentration à la crête principale (ppb)	Concentration à la crête théorique (ppb) (pour mélange complet)	Rapport
1	1,29	68	64	2,1	10,3	27,1	0,38	98	86,2	1,14
2	"	68	73	1,5	5,5	27,1	0,20	126	129,6	0,97
3	"	145	127	2,2	4,0	12,7	0,31	58	45,2	1,28
4	"	145	123	1,2	5,0	12,7	0,39	83	86,2	0,96
5	0,875	45	45	S.O.	6,3	22,4	0,28	165	140	1,18
6	"	86	100	"	4,0	11,8	0,33	Déversement	187	> 1,10
7	"	86	100	"	4,0	11,8	0,33	106	93	1,14
8	"	114	114	"	3,4	9,0	0,38	172	140	1,23

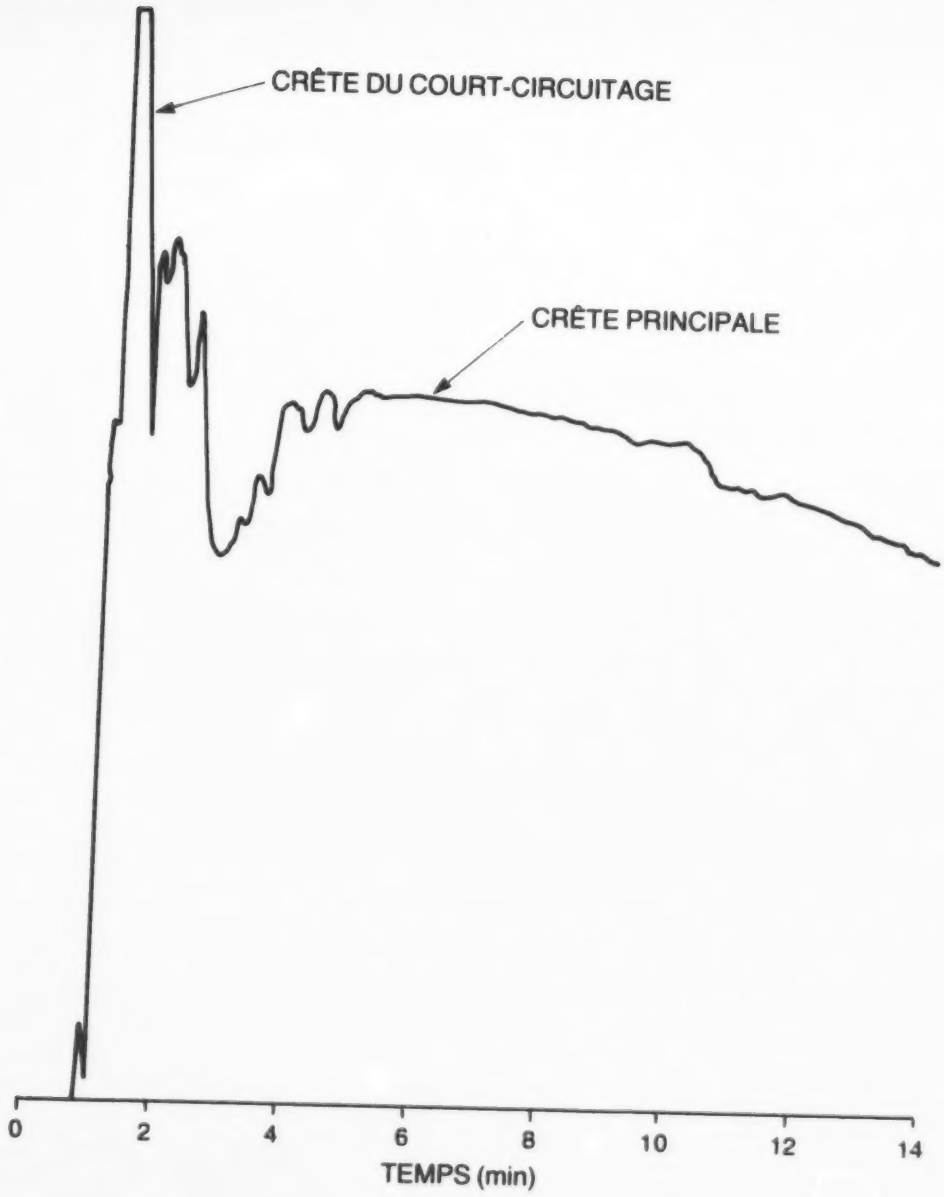


FIGURE C1 RÉACTION DU TRACEUR PORTANT SUR LE BASSIN DE FLOTTATION SOUS PRESSION ORIGINAL, MONTRANT LA CRÊTE DU COURT-CIRCUITAGE ET LA CRÊTE PRINCIPALE. TEST 2

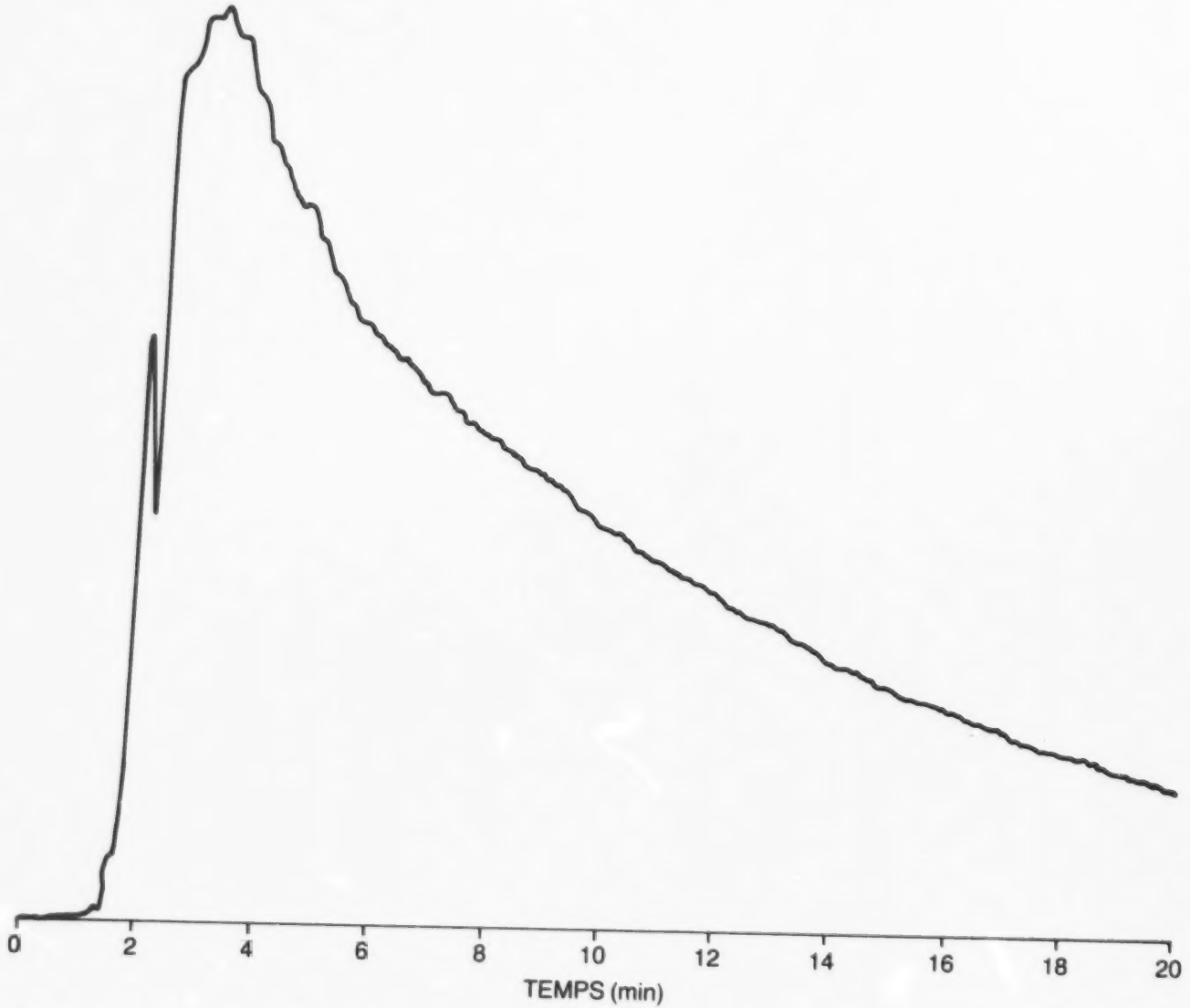


FIGURE C2 RÉACTION DU TRACEUR PORTANT SUR LE BASSIN DE FLOTTATION SOUS PRESSION MODIFIÉ. TEST 8

ANNEXE D

RÉSULTATS DES ESSAIS DE FLOCULATION

ANNEXE D RÉSULTATS DES ESSAIS DE FLOCULATION

TABLEAU D1 ESSAIS DE FLOCULATION DE LA PHASE 1

Produit chimique	Test	Dose du produit chimique (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Phosphore soluble total (mg/L)
Alun	Liqueur mixte		98	3,7
	1	60	2,2	0,1
	2	120	1,0	0
	3	150	0,1	0
	4	180	0,1	0
	5	240	0,1	0
	Contrôle	0	2,9	2,8
Chlorure ferrique	Liqueur mixte		—	2,1
	1	5	2,2	1,9
	2	10	1,9	1,8
	3	15	2,0	1,7
	4	20	1,8	1,7
	5	40	1,0	1,0
	Contrôle	0	2,6	2,6
	Liqueur mixte		--	1,7
	6	60	0,2	0,1
	7	120	0,2	0,1
	8	150	0,2	0,1
	9	180	0,1	0,1
	10	240	0,1	0,1
	Contrôle	0	1,6	1,6
Chaux	Liqueur mixte		--	1,4
	1	60	1,6	1,0
	2	120	1,0	0,3
	3	150	1,0	0,3
	4	180	1,0	0,3
	5	240	0,8	0,3
	Contrôle	0	1,4	1,4

TABLEAU D2 ESSAIS DE FLOCULATION DE LA PHASE 2

Produit chimique	Test	Dose du produit chimique (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Phosphore soluble total (mg/L)
Alun	Eaux d'égouts		5,6	3,0
	1	60	1,1	0,4
	2	120	0,5	0,5
	3	150	0,5	0,3
	4	180	0,2	0,3
	5	240	0,1	0,4
	Contrôle	0	3,0	3,0
Chlorure ferrique	Eaux d'égouts		4,1	1,7
	1	15	1,6	1,2
	2	25	1,3	1,0
	3	35	1,0	0,6
	4	45	0,7	0,3
	5	65	0,6	0,2
	Contrôle	0	3,6	1,6
Chaux	Eaux d'égouts		2,6	1,5
	1	60	0,7	0,4
	2	120	0,5	0,4
	3	150	0,3	0,3
	4	180	0,3	0,2
	5	240	0,1	0,1
	Contrôle	0	0,3	0,3

TABLEAU D3 ESSAIS DE FLOCULATION DE LA PHASE 3

Produit chimique	Test	Dose du produit chimique (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Phosphore soluble total (mg/L)
Alun	Liqueur mixte		20	0,8
	1	60	0,4	0,3
	2	120	0,2	0
	3	150	0	0
	4	180	0	0
	5	240	0	0
	Contrôle	0	1,0	0,7
Chlorure ferrique	Liqueur mixte		23	0,8
	1	10	0,4	0,1
	2	25	0,1	0
	3	40	0,1	0
	4	50	0	0
	5	60	0	0
	Contrôle	0	0,8	0,7

Coût afférents aux agents déphosphorants

Le tableau suivant, qui porte sur les coûts des produits chimiques se base sur les coûts moyens de 1977 visant le sud de l'Ontario:

Produit chimique	¢/kg (sec)	Rapport, basé sur la chaux = 1
Chlorure ferrique	18,8	5,70
Alun	10,4	3,15
Chaux	3,3	1,00

Il est clair que la chaux est le produit chimique le moins cher, même si on envisage l'utilisation de doses élevées. Cependant, elle a été rejetée à cause des problèmes causés par le pompage des coulis de chaux. En se basant sur le dosage

nécessaire pour enlever des quantités égales de phosphore, on voit que le chlorure ferrique revient moins cher que la chaux.

ANNEXE E

ÉCHANTILLON DE CALCULS ET APPLICATION DU PARAMÈTRE D'ÉPAISSISSEMENT ET DE L'ÉQUATION D'ÉPAISSISSEMENT

E.1 Échantillon de calculs pour les expériences (test 1, phase 3. Usine pilote)

Renseignements sur l'affluent:

Provenance:	Liqueur mixte provenant d'une usine d'épuration par boues activées ordinaire	
MSSLM:	2,616 mg/L	(1)
P total:	12,0 mg/L comme P	(2)
PST:	0,8 mg/L comme P	(3)

Addition du produit chimique:

Type:	$FeCl_3$	
Quantité:	28 mL/min à 4%	(4)

Addition du polymère:

Type:	Percol 728	
Quantité:	120 mL/min à 0,1%	(5)

Renseignements sur le fonctionnement:

Température:	13,5°C	
Pression:	380 kPa = 3,76 atm	(6)
Débit du liquide recirculé:	77,3 L/min	(7)
Débit de l'affluent:	45,5 L/min	(8)
OD:	34 mg/L	(9)
Écumoire:	8 min en marche, 2 min en arrêt	

Renseignements sur l'affluent:

MSS:	25 mg/L	(10)
P total:	0,3 mg/L	(11)
PST:	0,2 mg/L	(12)

Renseignements sur les matières solides flottantes:

MST:	69 790 mg/L	(13)

Calculs:

Concentration totale de matières solides dans l'affluent $= 1 \times 8$

$= 119\,000$ mg/min (14)

Dose du produit chimique $= \frac{4 \times 10^{-3} \times 4{,}0 \times 10^{4}}{8}$

$= 25$ mg/L

Dose du polymère $= \frac{5 \times 10^{3}}{17} = 1{,}0$ mg/L

Saturation d'oxygène dissous à 13,5° C et à 1 atm = 10,5 mg/L (15)
(d'après le tableau B2)

Saturation théorique d'oxygène dissous à la pression de fonctionnement $= 15 \times (6 + 1{,}0) = 50{,}0$ mg/L (16)

Saturation $= \frac{9}{16}$

$= 0{,}68$ ou 68% (17)

Saturation d'azote dissous à 13,5°C et à 1 atm = 1,74 mg/L (18)
(d'après le tableau C2)

Saturation d'air dissous à 13,5°C et à 1 atm = 27,9 mg/L (19)
(d'après le tableau B2)

La quantité d'air disponible pour la flottation est:

(quantité totale d'air dissous à la pression de fonctionnement - la quantité d'air restante à une atm.) x débit du liquide recirculé

$= \{[9 + 17 \times 18 \times (6 + 1{,}0)] - 19\} \times 7$

$= 4830$ mg/min (20)

A/MS: $= \frac{20}{14}$

$= 0{,}0406$ (21)

La concentration effective de matières solides dans l'effluent est

$$\frac{\text{(masse totale des matières solides entrant dans le bassin)}}{\text{(volume total de liquide entrant dans le bassin)}}$$

$= \frac{14}{(7 + 8)} = 969$ mg/L (22)

Le coefficient d'épaississement effectif est

$$\frac{\text{(concentration de matières flottantes)}}{\text{(concentration effective de matières solides dans l'affluent)}}$$

$$= \frac{13}{22}$$

$$= 72{,}0 \qquad (23)$$

Le paramètre d'épaississement est

$$\frac{\text{(coefficient d'épaississement effectif)}}{\text{(A/MS)}}$$

$$= \frac{23}{21}$$

$$= 1773$$

Réduction de MSS $= \frac{1 - 10}{1} \times 100$

$= 99{,}0\ \%$

Réduction du P total $= \frac{2 - 11}{2} \times 100 = 97\%$

Réduction du PST $= \frac{3 - 12}{3} \times 100 = 97\%$

Charge hydraulique, pour une surface de 0,836 m^2

$$= \frac{8 \times 10^{-3} \times 60{,}0}{0{,}836}$$

$$= 3{,}24\ m/h$$

Charge de matières solides $= \frac{14 \times 10^{6} \times 60}{0{,}836}$

$= 8{,}54\ kg/m^2 \cdot h$

E.2 Application du paramètre d'épaississement et de l'équation d'épaississement

Comme l'indique la section 7, le paramètre d'épaississement (PE) a d'abord été mis au point comme paramètre additionnel au rapport A/MS qui était généralement utilisé comme mesure du comportement de la flottation. Le PE peut s'exprimer de deux façons:

$$TP = \frac{\text{coefficient d'épaississement effectif}}{A/MS} = \frac{\left(\frac{\text{concentration de la flottation}}{\text{concentration effective de MSS dans l'affluent}}\right)}{A/MS}$$

$$\text{ou} \quad PE = \frac{F(V_b + V_r)}{A}$$

où: F = concentration du floc

V_b = volume des boues (affluent)

V_r = volume du liquide recirculé

Ainsi, la valeur du PE ne dépend pas de la concentration de matières solides dans l'affluent. Si le PE représente une constante pour un déchet particulier sans agents de flottation, il peut être utilisé:

a) pour établir, en termes de quantité, la flottabilité d'un déchet particulier (plus le PE est élevé, plus la zone des matières solides flottantes est épaisse pour une quantité donnée et plus le déchet est assujetti à l'épaississement par flottation);

b) pour évaluer les effets des agents de flottation (l'agent qui donne le PE le plus élevé serait le meilleur, en supposant que des facteurs économiques favorables existent aussi);

c) pour établir les besoins en air d'un système à l'échelle à partir des expériences en fonctionnement discontinu. Les expériences effectuées durant les phases 1 et 3 ont montré que les valeurs du PE, pour les conditions optimales présentes durant les tests en discontinu et à l'usine pilote, affichaient une différence d'environ 20 pour cent et que les tests en discontinu avaient donné les valeurs conservatrices. Ainsi, en pratique, une fois que le PE a été obtenu à la suite de l'expérience effectuée avec un déchet particulier à traiter, V_b, V_r et A ont pu être déterminés selon la concentration désirée du floc F.

Dans le calcul du PE, on suppose que la courbe du graphique représentant le coefficient d'épaississement effectif sur le A/MS passe par l'origine. Ceci s'est avéré dans certains cas, mais reste discutable, au point de vue statistiques, dans d'autres. Cependant, la régression linéaire a toujours été acceptable dans les limites de l'erreur expérimentale; même dans la phase 2, avec une grande dispersion des valeurs des concentrations de matières solides dans l'affluent, la régression linéaire était supérieure à 0,7 (figure 20). Dans les cas où la courbe du graphique représentant le coefficient

d'épaississement effectif sur le A/MS ne passait pas par l'origine, les valeurs du PE étaient très éparpillées, rendant ainsi préférable l'utilisation de l'équation d'épaississement (EE) aux fins de conception ou de prévisions. L'EE représente la régression linéaire du graphique du coefficient d'épaississement effectif sur le A/MS. Une fois que cette équation a été établie à partir des expériences, elle peut être utilisée aux fins de conception ou de prévisions d'une façon semblable au PE. Dans ce cas, cependant, la valeur de la concentration des matières solides dans l'affluent forme une partie de l'équation et elle doit être posée avant de déterminer la concentration des matières solides flottantes et (ou) les besoins en air. L'ingénieur ou le responsable de l'usine devra décider s'il est justifié d'utiliser le PE plutôt que l'EE. Il est évident que le PE a un champ d'application plus étendu, car il ne dépend pas de la concentration de matières solides dans l'affluent.

Le PE et l'EE ne s'appliquent que pour établir les besoins en air nécessaires à l'obtention d'une certaine concentration de matières flottantes. Un paramètre semblable a été utilisé pour obtenir la concentration de matières solides dans l'affluent, mais les résultats sont inutilisables, Le PE et l'EE ne couvrent pas les exigences relatives à la superficie et au volume du bassin de flottation. La vitesse d'ascension a été utilisée auparavant pour déterminer ces valeurs à partir des tests en discontinu, mais les auteurs se sont aperçus que l'établissement de cette vitesse d'ascension était problématique et que les résultats étaient inconsistants; ils recommandent d'effectuer des tests en usine pilote afin de déterminer ces paramètres.

E.3 Exemple de conception

Cette section explique comment utiliser les renseignements sur le comportement de l'épaississement d'une boue particulière pour déterminer le rapport A/MS requis.

Méthodologie:

1) Tests en discontinu:

   a) Déterminer le paramètre d'épaississement ou l'équation d'épaississement pour le déchet sans agents de flottation.

   b) Choisir le type et la dose du produit chimique ou la pente la plus élevée de l'EE et (ou) la concentration la plus faible de matières solides dans l'effluent.

2) Tests à l'usine pilote:

   a) Confirmer le PE ou l'EE et la dose du produit chimique.

b) Déterminer la charge optimale de matières solides ou hydrauliques.

c) Déterminer la méthode optimale d'élimination des matières solides flottantes.

En alternant, utiliser le PE ou l'EE obtenus à partir des tests en discontinu et obtenir la charge des matières solides ou hydrauliques du fabricant.

3) a) Établir la capacité de l'unité à l'échelle à l'aide de la charge de matières solides ou hydrauliques.

b) À l'aide du PE ou de l'EE, déterminer la quantité maximale d'air et, ensuite, la vitesse de recirculation nécessaire pour obtenir la concentration des matières solides flottantes requise.

c) La dose de produit chimique vient de 1 ou de 2.

Exemple:

Usine d'épuration ordinaire par boues activées d'une capacité de 45 500 m^3/j (voir aussi l'Annexe K)

Équation d'épaississement (voir la figure 33)

$$y = 1\,490\,x + 13$$

où y = coefficient d'épaississement effectif

$x = A/MS$

Débit d'entrée = $4{,}5 \times 10^6$ L/j

MSS dans l'affluent = 2 900 (mg/L)

Matières solides flottantes totales = 6% (désiré) = 60 000 (mg/L)

Vitesse de recirculation = $r \times 10^6$ L/j (r = ML/j)

Concentration effective de matières solides dans l'affluent

$$= \frac{2\,900 \times 45 \times 10^6 \text{ (mg/j)}}{(45 + r) \times 10^6 \text{ (L)}}$$

$$= \frac{130\,000}{(45 + r)} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L-j}}\right)$$

$$\therefore y = \frac{\text{Matières solides flottantes totales}}{\text{conc. effec. de mat. sol. dans l'affl.}}$$

$$= \frac{60\,000 \times (45 + r)}{130\,000}$$

$$= 0{,}4598\,(45 + r)\,(j)$$

$$x = \frac{A}{MS}$$

où A = air amené par le liquide recirculé (mg/j)

= $[(O_p + PN_\theta) - (O_\theta = N_\theta)]\ r \times 10^6$ (θ = température de fonctionnement)

Supposons que la température = 20°C

donc O_θ = 9,2 (mg/L)

N_θ = 15,4 (mg/L)

f = efficacité de l'éjecteur

= 0,6 (supposé)

Supposons que la pression = 410 kPa

= 4,1 atm

$\therefore$ P = 4,1 + 1 = 5,1 atm

O_p = 5,1 x 9,2 x 0,6 (Normalement, on avait déjà la valeur de O_p)

$\therefore$ A = $[5,1 \times 0,6\ (9,2 + 15,4) - (9,2 + 15,4)]\ r \times 10^6$

= $\underline{50,68\ r \times 10^6\ (mg/j)}$

MS = $4,5 \times 10^6 \times 2\ 900$

= $\underline{1,305 \times 10^{11}\ (mg/j)}$

$\therefore$ $x = \frac{A}{MS} = \frac{50,68\ r \times 10^6}{1,305 \times 10^{11}} = \underline{38,84\ r \times 10^{-5}}$

$\therefore$ de $y = 1\ 490\ x + 13$

$0,4598\ (45 + r) = 1\ 490\ (38,84\ r \times 10^{-5}) + 13$

$20,69 + 0,4598\ r = 0,5787\ r + 13$

$\therefore$ $0,1189\ r = 7,69$

ou r = 64,68 (ML/j)

disons r = $\underline{65\ (ML/j)}$

ou le rapport de recirculation = $\frac{65}{45} = \underline{1,44}$

Ainsi, A/MS = $38,84 \times 65 \times 10^{-5}$

= $\underline{0,025}$

Remarque: Les calculs de l'énergie pour la phase 3 (dans le tableau K2) ont été effectués avec un rapport de recirculation de 1,5 et un A/MS de 0,026.

ANNEXE F

RÉSUMÉ DES POLYMÈRES UTILISÉS

ANNEXE F RÉSUMÉ DES POLYMÈRES UTILISÉS

Fabricant	Type		Caractéristique	Forme
Allied Colloids	Percol	720	Non ionique	Poudre
(Canada) Ltd	"	722	Teneur moyenne en cation	Grains microscopiques
	"	725	Teneur moyenne en cation	Poudre
	"	726	Haute teneur en anion	Poudre
	"	728	Teneur moyenne en cation	Poudre
	"	730	Faible teneur en anion	Poudre
		744	Très haute teneur en cation	Liquide, 15%
	"	751	Très haute teneur en cation	Liquide, 20%
	"	757	Haute teneur en cation	Grains microscopiques
	"	763	Haute teneur en cation	Grains microscopiques
	"	776	Haute teneur en cation	Grains microscopiques
Hercules Inc.	Hercofloc	812	Faible teneur en cation	Poudre
	"	815	Teneur moyenne en cation	Poudre
	"	818	Faible teneur en anion	Poudre
	"	831	Teneur moyenne en anion	Poudre
	"	834	Haute teneur en cation	Liquide, 15%
	"	849	Teneur de moyenne à haute en cation	Poudre
	"	855	Teneur de moyenne à haute en cation	Poudre
Calgon Canada	Cat-Floc	A	Teneur moyenne en cation	Liquide, 12%
	E-207L		Faible teneur en cation	Liquide 6%
	M-540		Teneur moyenne en cation	Liquide, ?
	M-600		Teneur en anion	Liquide, ?
	WT-2690		Non ionique	Poudre
	WT-2870		Forte teneur en cation	Liquide, ?
	WT-3000		Teneur en anion	Poudre

Remarque: "Liquide, 15%", signifie un polymère avec 15% de matières solides actives.

ANNEXE G

RÉSULTATS DES TESTS EN DISCONTINU

ANNEXE G RÉSULTATS DES TESTS EN DISCONTINU

TABLEAU G1 DÉTERMINATION DU A/MS OPTIMAL. UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN DISCONTINU. PHASE 1

Test	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Pression (kPa)	Rapport de recirculation	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Matières solides flottantes totales (%)	Saturation d'air (%)	A/MS x 100	PE	Réduction des matières solides en suspension (%)
1	5687	345	1,97	39	4,42	80,3	2,45	943	99,3
2	6431	345	0,93	55	4,29	87,2	1,15	1124	99,1
3	5546	276	1,34	53	4,20	98,5	1,80	988	99,0
4	5311	310	1,28	36	4,56	81,0	1,49	1313	99,3
5	5292	310	1,97	89	4,69	86,3	2,61	1008	98,3
6	5292	310	0,93	51	4,16	88,0	1,31	1158	99,0
7	4940	207	1,43	65	3,95	95,8	1,58	1231	98,7
8	6122	207	1,70	51	3,88	96,0	1,51	1136	99,2
9	6413	207	2,20	33	4,25	99,3	1,91	1107	99,5
10	6239	207	2,51	37	4,34	99,3	2,23	1095	99,4
11	6239	207	0,67	11	3,58	98,3	0,62	1552	99,9

TABLEAU G2 TESTS EN DISCONTINU AVEC POLYMÈRE. CHOIX DU POLYMÈRE ET DOSE OPTIMALE DE POLYMÈRE, PHASE I

Test	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Pression (kPA)	Rapport de recirculation	Type de polymère	Dose (mg/g)	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Matières solides flottantes totales (%)	Saturation d'air (%)	A/MS x 100	PE	Réduction des matières solides en suspension (%)	Coûts du test en ¢/kg de matières solides
1	5954	207	2,51	Hercofloc 849	1,05	29	3,89	94,3	1,9	1209	99,5	0,603
2	5954		2,51	Percol 744	1,05	20	3,94	95,7	2,00	1162	99,7	0,557
3	4475		1,77	Hercofloc 834	0,656	5	1,85	97,0	2,13	536	99,9	
4	4475			Percol 728	0,99	10	2,53	91,0	1,93	811	99,8	0,408
5	4747			Calgon WT2870	0,28	16	1,62	96,0	1,97	479	99,7	0,122
6	4747			Calgon E2607	0,056	50	2,04	94,2	1,89	628	98,9	0,053
7	3969		1,81	-	-	72	1,88	95,3	2,35	565	98,2	-
8	4404		1,77	Percol 757	1,00	-	3,76	91,0	1,93	1224	-	0,448
9	5599		1,77	Calgon cat floc A	0,757	-	3,90	92,2	1,57	1227	-	0,416
10	5488		2,24	Percol 751	1,02	27	4,33	92,7	1,99	1287	99,5	0,372
11	3789		2,24	Hercofloc 855	1,48	15	3,58	91,5	2,80	1066	99,6	0,751
12	3819	310	1,97	Percol 728	1,11	32	4,30	86,1	3,68	911	99,2	0,464
13	3819		1,28	Percol 728	0,726	25	4,01	84,6	2,34	1024	99,3	0,301
14	4031		1,28	Percol 744	0,715	41	3,76	90,0	2,11	1010	99,0	0,377
15	4031			Calgon WT2870	0,714	13	4,14	88,0	2,16	1084	99,7	0,314
16	4306			Percol 751	0,64	9	4,10	87,0	2,13	1020	99,8	0,234
17	4306			Percol 757	0,64	7	4,06	87,0	1,99	1080	99,8	0,288
18	8645		1,55	Percol 759	0,39	22	3,58	91,6	1,28	826	99,7	0,174
19	8645			Percol 757	0,75	20	3,63	87,8	1,28	838	99,8	0,335
20	8167			Percol 757	1,27	12	3,33	86,3	1,33	782	99,9	0,568
21	8167			Percol 757	0,26	31	3,59	89,0	1,44	779	99,8	0,116
22	3888			Percol 751	0,87	39	3,71	91,0	2,91	836	99,0	0,316
23	3888			Calgon WT2870	0,84	31	3,90	91,5	3,03	845	99,2	0,370
24	3689			Hercofloc 855	0,91	10	3,72	96,3	3,31	779	99,7	0,460
25	3689			Hercofloc 849	0,91	8	3,66	92,0	3,06	827	99,8	0,521
26	3172			Percol 757	1,06	19	4,10	92,0	3,47	952	99,4	0,474
27	3172			Percol 728	1,06	11	3,78	93,0	3,61	843	99,6	0,439
28	3425		1,11	Percol 757	0,7	5	3,93	94,0	2,44	991	99,9	0,313
29	3425		1,11	Percol 728	0,7	20	3,66	94,0	2,44	921	99,4	0,290
30	3196		1,32	Percol 757	0,89	5	4,15	93,0	3,19	942	99,8	0,397
31	3196		1,32	Hercofloc 849	0,89	5	3,69	90,0	2,99	895	99,8	0,509
32	4048	276	1,11	Percol 757	0,71	-	3,85	92,5	2,04	982	-	0,317
33	4048		1,23	Percol 757	0,71	-	4,11	88,0	1,93	1171	-	0,317
34	3795		1,18	Percol 757	1,55	-	4,15	91,0	2,23	1067	-	0,693

TABLEAU G3 DÉTERMINATION DU A/MS OPTIMAL. UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN DISCONTINU, PHASE 2

Test	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Rapport de recirculation	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Saturation d'air (%)	A/MS x 100	Réduction des matières solides (%)	Captation des matières solides (%)
1	391	0,94	79	92,5	1.70	80	67
2		0,69	83	92,5	1,26	79	64
3		0,43	189	96,4	0,875	52	31
4	190	0,69	85	84,0	2,26	55	23
5		0,93	66	90,0	3,43	65	33
6		1,34	57	85,0	4,40	70	30
7		1,97	45	89,0	6,83	76	31

Pression: Constante à 275 kPa

TABLEAU G4 DÉTERMINATION DU A/MS OPTIMAL. UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN DISCONTINU, PHASE 3

Test	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Rapport de recirculation	Matières solides en suspension dans l'effluent	Matières solides flottantes totales (%)	Saturation d'air (%)	A/MS x 100	PE	Réduction des matières solides (%)
1	2531	0,924	49	6,94	89	2,82	1887	98,0
2	2531	1,28	57	6,56	91	3,83	1543	97,7
3	2393	1,97	45	6,10	86	5,74	1320	98,0
4	2393	0,43	34	5,94	93	1,27	2794	98,6
5	2713	2,24	77	6,06	88	5,89	1229	97,0
6	2713	0,69	62	6,54	89	1,93	2107	97,7

Pression: Constante à 275 kPa
PE: Moyenne = 1813, σ = 585, CV = 0,32

TABLEAU G5 CHOIX DU POLYMÈRE. UNITÉ DE FLOTTATION SOUS PRESSION EN DISCONTINU, PHASE 3

Test	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Type du polymère	Coût relatif	Dose (mg/g)	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Matières solides flottantes totales (%)	Saturation d'air (%)	A/MS x 100	PE	Réduction de matières solides en suspension
1	2767	Percol 728	0,91	0,84	101	7,42	85	2,87	1966	96,3
2	2767	Calgon WT3000	0,88	0,86	129	6,98	86	2,77	1917	95,0
3	3019	Percol 757	1,00	0,70	130	6,71	86	2,59	1807	95,7
4	3019	Hercofloc 855	1,13	0,61	106	6,60	87	2,57	1791	96,5
5	1902	Percol 720	0,83	1,30	136	5,82	85	4,17	1544	92,8
6	1902	Hercofloc 812	0,76	1,45	86	7,01	91	4,48	1732	95,0
7	2781	Percol 722	0,91	0,83	90	6,20	89	2,89	1624	97,0
8	2781	Calgon WT2690	0,88	0,86	117	6,28	88	2,85	1667	96,0
9	2811	Percol 763	0,93	0,80	95	5,64	88	2,87	1471	96,6
10	2811	Hercofloc 815	0,81	0,92	127	6,72	87	2,77	1818	95,4
11	2716	Percol 776	1,00	0,77	78	6,52	90	3,01	1680	97,0
12	2716	Hercofloc 849	1,27	1,27	85	7,10	89	2,93	1874	97,0

Test	Matières solides en suspension dans l'affluent (mg/L)	Type du polymère	Dose (mg/g)	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Matières solides flottantes totales (%)	Saturation d'air (%)	A/MS x 100	PE	Réduction de matières solides en suspension (%)
13	3105	Percol 728	0,57	77	6,96	88	2,54	1857	97,5
14	3105	Hercofloc 849	0,43	136	6,74	90	2,63	1475	95,6
15	3212	Percol 728	0,96	113	7,04	87	2,43	1898	96,5
16	3212	Hercofloc 849	0,69	55	6,43	88	2,41	1750	98,3
17	2265	Percol 728	1,66	85	7,18	84	3,27	2040	96,0
18	2265	Hercofloc 849	1,17	125	6,75	86	3,22	1948	94,5

Le Percol 757 a été utilisé à titre de donnée, c'est-à-dire le coût relatif de 1. La quantité du polymère ajoutée a alors été basée sur une dose de 0,70 mg/g, 3000 mg/L de matières solides en suspension dans l'affluent et un rapport de recirculation de 1,1.
Le dosage des autres polymères (mg/g) a été établi en se basant sur un rapport inverse au coût relatif.

ANNEXE H

RÉSULTATS DES TESTS À L'USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION

TABLEAU H1 AUCUNE ADDITION. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 2

					Affluent			Effluent									
Test	Rapport de recirculation	Saturation d'air (%)	A/MS x 10	Débit (L/min)	Matières solides en suspension (mg/L)	DOC (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Matières solides en suspension (mg/L)	DOC (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Matières solides flottantes totales (%)	PE	Réduction des matières solides (%)	Réduction de la DOC (%)	Réduction du phosphore total (%)	Charge hydraulique (m/h)	Charge de matières solides (kg/m²•h)
1	1,6	49	2,6	45	235	-	4,3	95	-	3,1	5,9	2513	60	-	28	3,25	0,77
2	1,6	47	5,18	45	110	-	2,3	40	-	1,5	5,37	2450	64	-	35		0,36
3	1,6	45	2,61	45	203	-	5,0	57	-	3,7	3,29	1619	72	-	26		0,66
4	1,6	52	6,94	45	100	-	3,0	10	-	1,3	3,92	1468	90	-	57		0,33
5	1,25	50	1,96	91	237	580	7,1	181	390	5,2	3,96	1922	24	33	27	6,5	1,55
6	1,2	51	3,67	91	129	340	3,5	56	170	2,6	5,81	2681	57	50	26		0,84
7	1,07	51	3,26	91	125	440	5,8	86	900	5,0	3,7	1883	31	117	7		0,82
8	1,23	52	7,5	91	63	-	-	50	-	4,4	6,56	3009	23	-	-		0,42
9	1,04	54	6,67	91	71	160	3,1	41	150	4,3	3,51	1514	42	56	39		0,46
10	0,8	49	1,52	91	206	830	9,3	95	200	4,8	5,67	3273	54	76	48		1,34
11	0,65	58	0,714	91	491	340	9,9	49	680	5,7	5,58	2622	90	-100	42		3,20
12	0,75	56	1,08	91	361	540	6,0	97	240	3,2	6,05	2826	73	56	47		2,35
13	0,8	55	1,82	91	209	550	4,8	54	310	4,8	8,02	3799	74	44	24		1,36
14	0,8	58	5,8	91	72	410	-	42	150	-	7,67	3306	42	63	-		0,47
15	0,8	57	2,43	91	169	380	-	55	190	-	6,33	2776	67	50	-		1,10
16	0,7	56	1,80	91	199	470	-	81	230	-	5,11	2427	59	47	-		1,30
17	0,8	55	1,57	91	242	500	-	-	290	-	5,5	2613	-	42	-		1,58
18	0,8	52	1,39	91	251	540	-	129	340	-	6,2	3208	49	37	-		1,64
21	0,57	55	1,06	109	257	500	-	116	200	-	6,3	3626	55	60	-		2,01
22	0,66	54	0,979	109	314	940	-	235	770	-	7,63	4146	25	18	-		2,46

A/MS: Moyenne x 10 = 3,47, σ x 10 = 2,60

TABLEAU H2 ADDITION DU POLYMÈRE. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 2

	Dose						Affluent			Effluent								
Test	mg/L	mg/g	$FeCl_3$ (mg/L)	Rapport de recirculation	Saturation d'air (%)	A/MS x 10	Débit (L/min)	Matières solides en suspension (mg/L)	DOC (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Matières solides en suspension (mg/L)	DOC (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Matières solides flottantes totales (%)	PE	Réduction des matières solides en suspension (%)	Réduction de la DOC (%)	Réduction phosphore total (%)	Charge hydraulique (m/h)	Charge de matières solides (kg/m²·h)
23	0,22	0,72	-	0,46	48	0,735	109	255	466	-	32	146	-	4,0	3116	87	70	-	7,8	2,00
24	0,22	0,90	-	0,66	52	0,63	109	461	650	-	332	210	-	4,49	2693	30	68	-		3,61
25	0,22	1,0	-	1,1	56	1,99	91	211	410	6,5	66	466	6,5	3,1	1468	70	-14	-		1,44
26	0,22	1,27	-	1,1	35	1,16	91	173	450	6,0	79	460	6,9	2,7	2804	54	-7	18	6,5	1,13
27	0,22	,067	-	1,1	67	1,09	91	327	680	9,8	95	335	6,9	5,7	3338	71	51	69		2,13
28	0,22	,076	-	1,2	46	1,27	91	299	730	8,1	152	320	6,9	6,75	3908	69	56	40		1,95
29	0,22	0,40	-	1,2	50	1,61	91	278	540	8,0	117	320	6,9	9,1	4569	58	41	55		1,81
30	0,44	2,35	-	1,1	54	2,68	91	187	420	6,1	66	220	3,6	6,0	2713	65	48	61		1,22
31	0,44	1,73	-	0,7	90	1,14	91	252	520	9,1	77	240	5,6	6,7	2812	69	54	38		1,64
32	0,44	2,75	-	1,2	63	2,11	91	160	360	6,7	53	150	6,5	7,1	4597	67	58	33		1,04
33	0,44	1,96	-	1,2	69	1,89	91	225	450	7,6	44	190	6,7	5,4	2786	80	58	38		1,47
34	0,44	3,16	-	1,2	69	3,08	91	139	320	6,5	29	110	3,6	6,0	3681	79	66	45		0,91
35	0,44	2,03	-	1,2	54	2,72	91	181	360	6,4	46	150	4,2	5,1	2261	75	58	34		1,18
36	0,44	0,81	-	1,2	52	0,879	91	344	530	9,0	100	280	4,5	7,8	3393	82	57	50		2,25
37	0,44	1,57	-	1,2	50	1,6	91	280	610	6,9	142	380	5,8	7,38	3729	69	38	9		1,83
38	0,55	2,73	-	1,1	-	-	91	201	380	5,8	63	190	3,7	6,2	-	68	50	36		1,31
39	0,55	1,39	-	0,8	-	-	91	395	660	6,1	233	460	5,1	-	-	41	30	16		2,58
40	0,52	2,0	-	1,02	43	1,18	91	283	530	7,5	91	280	4,5	2,36	1429	68	47	40		1,85
41	0,66	2,69	-	1,37	42	1,37	91	265	500	5,6	61	240	4,2	8,0	4239	77	52	25		1,73
42	0,66	5,55	-	1,25	48	3,5	91	119	380	6,9	37	230	6,2	5,36	2882	69	39	10		0,78
43	0,66	3,38	-	1,0	-	-	91	195	400	-	47	130	3,9	6,95	-	76	68	-		1,27
44	0,88	3,96	-	0,8	46	1,27	91	222	-	7,0	62	-	3,9	6,14	3918	81	-	44		1,65
45	0,88	6,97	-	0,8	50	1,91	91	177	-	-	18	-	-	6,15	3274	90	-	-		1,15
46	0,88	2,26	-	0,8	52	0,927	91	388	-	5,6	95	-	3,1	5,56	2777	76		43		2,54

A/MS: Moyenne x 10 = 1,66, σ x 10 = 0,776

TABLEAU H3 ADDITION DE $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 2

	Dose							Affluent			Effluent								
Test	mg/L	mg/g	$FeCl_3$ (mg/L)	Rapport de recirculation	Saturation d'air (%)	A/MS x 10	Débit (L/min)	Matières solides en suspension (mg/L)	DOC (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Matières solides en suspension (mg/L)	DOC (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Matières solides flottantes totales (%)	PE	Réduction des matières solides en suspension (%)	Réduction de la DOC (%)	Réduction phosphore total (%)	Charge hydraulique (m/h)	Charge de matières solides, (kg/m²•h)
47	-	-	24	1,6	49	11,1	65	55	-	0,8	35	-	0,5	1,9	761	47	-	38	1,25	0,18
48	-	-	24	1,6	58	5,64	65	146	-	2,3	26	-	0,7	1,47	464	84	-	70		0,48
49	-	-	24	1,6	62	18,97	65	48	-	0,6	10	-	0,4	5,40	971	79	-	33		0,16
50	-	-	26	0,72	49	2,81	91	104	140	1,7	28	65	0,3	3,87	2446	73	54	82	6,5	0,68
51	-	-	25	0,7	52	2,39	91	133	200	2,1	18	120	-	3,15	1691	86	40	99,9		0,87
52	-	-	25	0,7	59	2,23	91	143	220	6,4	147	220	0,8	6,1	5234	-	-	87		0,93
53	-	-	42	0,8	30	1,37	91	238	350	5,7	102	350	5,0	5,45	5031	57	40	10		1,59
54	-	-	42	0,7	53	1,10	91	295	170	3,0	162	130	1,9	5,12	1648	45	24	37		1,91
55	-	-	42	0,8	52	1,02	91	339	700	8,7	141	590	6,5	2,43	1265	58	16	25		2,21
56	-	-	42	0,8	56	6,10	91	66	130	2,7	51	94	1,5	3,87	1783	20	28	44		0,42
57	-	-	51	0,8	59	3,09	91	163	-	1,0	67	-	0,1	1,79	728	67	67	90		0,93
58	-	-	51	0,8	63	0,657	136	677	-	4,6	313	-	3,3	2,69	1088	54	54	28		4,41
59	-	-	20	0,67	33	0,523	136	281	620	5,9	327	600	7,0	7,73	10222	5	3	-19	9,75	2,22
60	-	-	20	0,57	24	0,614	136	323	200	3,5	299	160	3,4	4,58	3617	20	20	3		2,53
61	-	-	20	0,67	45	1,61	136	136	670	7,1	106	660	5,0	6,66	3604	29	10	18		1,02
62	-	-	25	0,66	67	1,43	136	163	320	5,2	82	80	5,0	8,11	5800	50	64	4		0,80

A/MS: Moyenne x 10 = 3,79, σ x 10 = 4,90

TABLEAU H6 ADDITION DU POLYMÈRE ET DE $FeCl_3$. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 2

	Dose							Affluent			Effluent								
Test	mg/L	mg/g	$FeCl_3$ (mg/L)	Rapport de recirculation	Saturation d'air (%)	A/MS x 10	Débit (L/min)	Matières solides en suspension (mg/L)	DOC (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Matières solides en suspension (mg/L)	DOC (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	Matières solides flottantes totales (%)	pH	Réduction des matières solides en suspension (%)	Réduction de la DOC (%)	Réduction phosphore total (%)	Charge hydraulique (m/h)	Charge de matières solides (kg/m²-h)
63	0,88	9,17	31	0,8	34	4,00	91	96	-	0,9	10	-	0	3,07	2377	90	-	100	6,5	0,63
64	0,88	6,81	31	0,8	36	2,21	91	183	-	1,0	18	-	0	3,10	1381	90	-	100		1,19
65	0,88	5,13	31	0,8	61	2,71	91	171	-	9,6	17	-	0,3	4,02	1718	90	-	83		1,11
66	0,18	1,08	27	0,66	69	1,39	109	169	390	-	86	290	-	6,5	2803	49	38	-	7,8	1,32
67	0,18	1,09	27	0,66	31,5	1,7	109	168	300	-	119	380	-	6,2	3620	29	24	-		1,32
68	0,37	3,30	27	0,66	38	3,1	109	111	180	2,7	76	140	1,8	6,23	3001	33	22	33		0,87
69	0,37	1,47	27	0,66	36	1,3	109	230	370	3,5	168	920	6,6	3,33	1810	61	26	20		1,96
70	0,88	3,3	30	0,8	32	1,19	136	267	-	3,0	168	-	1,8	3,63	3199	37	-	67	9,75	2,61
71	0,88	6,87	30	0,8	65	1,93	136	128	-	1,0	12	-	0	5,70	6118	91	-	100		1,25
72	0,88	2,13	30	0,8	32	0,771	136	413	-	3,2	83	-	1,0	3,02	1683	80	-	81		4,06

A/MS: Moyenne x 10 = 2,052, σ x 10 = 0,98

TABLEAU H5 RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES, USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 3

Traitement No.	Test	Dose du polymère (mg/g)	Dose de $FeCl_3$ (mg/L)	A/MS x 100	Débit (L/min)	Affluent		Effluent		Matières solides flottantes totales (%)	PE	Réduction du phosphore soluble (%)	Charge hydraulique (m/h)	Charge de matières solides ($kg/m^2 \cdot h$)
						Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)	Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)					
1	1	1,00	25	4,06	45	2116	0,8	25	0,2	6,98	1773	75	3,24	8,54
	2	0,97	25	3,81	45	2725	0,8	39	0,2	5,50	1430	75	3,24	8,89
	3	0,84	25	2,82	45	3129	0,7	72	0,1	5,16	1579	86	3,24	10,21
	4	1,07	26	3,57	45	2463	1,2	33	1,7	5,00	1535	-	3,24	8,09
2	5	1,01	-	3,46	68	2684	0,6	35	1,0	6,68	1918	-67	4,88	13,08
	6	0,92	-	3,21	68	2936	1,3	39	1,8	7,49	2118	-38	4,88	14,36
	7	0,94	-	3,43	68	2871	1,0	81	0,2	5,84	1579	10	4,88	14,06
3	8	1,46	-	3,37	45	2860	-	30	-	6,14	1718	-	3,24	9,33
	9	1,48	-	3,37	45	2821	-	22	-	6,30	1670	-	3,24	9,18
	10	1,47	-	3,40	45	2837	-	26	-	6,69	1875	-	3,24	9,27
4	11	1,39	25	3,34	68	2627	1,8	17	-	7,18	2185	33	4,88	12,84
	12	1,35	25	2,81	68	3091	0,5	14	0,2	8,55	2624	100	4,88	15,15
	13	1,44	25	3,31	68	2912	0,6	15	0,2	6,55	1811	100	4,88	10,26
5	14	0,85	-	3,74	45	3118	-	105	-	6,06	1818	-	3,24	10,16
	15	0,91	-	4,90	45	2890	-	60	-	7,12	1758	-	3,24	9,42
	16	0,85	-	4,13	45	3114	-	71	-	6,69	1820	-	3,24	10,15
	17	0,85	-	4,26	45	3094	1,1	28	0,3	7,1	1878	98,5	3,24	10,10
6	18	0,85	25	2,56	68	3107	0,3	35	0,1	6,03	2680	98,5	4,88	15,18
	19	0,91	25	3,49	68	2895	2,0	21	0,3	6,36	2223	97,9	4,88	14,16
	20	0,89	25	3,16	68	2971	1,0	28	0,2	6,76	2544	99	4,88	14,55
7	21	1,36	26	4,30	45	3059	0,7	20	0,1	7,6	2019	86	3,24	9,96
	22	1,28	26	3,89	45	3249	0,5	101	0,2	6,2	1712	60	3,24	10,60
	23	1,67	26	5,06	45	2505	0,5	26	0,2	8,0	2225	60	3,24	8,15
	24	1,58	25	5,43	45	2635	1,8	17	0,3	7,31	1767	83	3,24	8,64

TABLEAU H5 RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 3 (suite)

Traitement No.	Test	Dose du polymère (mg/g)	Dose de $FeCl_3$ (mg/L)	A/MS x 100	Débit (L/min)	Affluent		Effluent		Matières solides flottantes totales (%)	PE	Réduction du phosphore soluble (%)	Charge hydraulique (m/h)	Charge de matières solides ($kg/m^2 \cdot h$)
						Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)	Matières solides en suspension (mg/L)	Phosphore soluble (mg/L)					
8	25	1,52	-	4,06	68	2753	0,8	13	0,7	6,77	2138	12,5	4,8	13,48
	26	1,52	-	4,78	68	2757	0,8	23	0,2	7,44	1993	77,8	4,8	13,48
	27	1,66	-	3,68	68	2317	1,0	43	0,9	7,46	2845	10	4,8	12,20
	28	1,60	-	3,54	68	2619	1,0	34	1,0	7,19	2738	0	4,8	11,53
9	29	0,80	-	2,91	45	3312	-	23	-	7,37	2065	-	3,24	10,79
	30	0,86	-	2,00	45	3076	1,3	58	1,0	5,11	2280	30	3,24	10,01
	31	0,78	-	2,64	45	3385	1,7	48	1,7	6,08	1831	-	3,24	11,03
10	32	1,31	-	3,67	45	3180	-	48	2,5	6,61	1980	-	3,24	10,35
	33	1,42	-	4,83	45	2933	-	36	-	6,14	1516	-	3,24	9,57
	34	1,69	-	5,45	45	2469	-	44	-	6,57	1706	-	3,24	8,06
11	35	1,39	-	2,58	68	2999	-	49	-	6,33	2180	-	4,88	14,65
	36	1,40	-	2,73	68	2969	-	31	-	8,23	2707	-	4,88	14,50
	37	1,70	-	3,16	68	2445	2,0	116	1,8	5,63	1944	10	4,88	14,40
12	38	0,43	-	3,23	45	3049	0,4	71	0,4	5,41	1483	0	3,24	9,77
13	39	0,48	-	2,70	68	2725	1,0	390	0,8	5,76	2084	20	4,88	13,30
14	40	0,67	-	4,39	68	1983	0,8	356	0,4	5,87	1797	50	4,88	9,72
15	41	0,42	25	2,87	45	3103	0,8	38	0,2	4,64	1406	75	3,24	10,11
	42	0,45	25	3,09	45	2903	1,2	39	1,5	5,18	1557	75	3,24	9,47
16	43	1,15	-	2,07	91	2669	1,7	35	1,7	6,50	2658	0	6,50	17,38
	44	0,81	-	1,97	91	3256	1,2	53	1,1	6,25	2680	8	6,50	21,24
	45	0,77	-	1,87	91	3435	1,2	41	0,9	5,95	2545	25	6,50	22,46

ANNEXE I

ANALYSE DU PLAN FACTORIEL

USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 3

ANNEXE I ANALYSE DU PLAN FACTORIEL. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 3

Description du plan (voir Davies, 1956, chapitres 7, 9, 10).

Le plan représente 1/2 fois la valeur 2^4, c'est-à-dire 2^{4-1}, chaque traitement étant répété au moins trois fois; il y avait huit séries de traitement et l'analyse se base sur les données provenant de 24 expériences. Les données de réaction sont présentées dans le tableau H5. On remarque que les tests, 4, 17, 22 et 26 n'ont pas servi à l'analyse statistique.

TABLEAU II VARIABLES UTILISÉES DANS LE PLAN FACTORIEL FRACTIONNEL

	Variables indépendantes			
		Niveaux et signe		
Symbole	Variable	Inférieur	Supérieur	Variables dépendantes
a	Dose du produit chimique (mg/L)	0 -	25 +	Matières solides flottantes totales (%)
b	Débit de l'affluent (L/min)	45 -	68 +	Matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)
c	Dose du polymère (mg/g)	0,88 -	1,39 +	Paramètre d'épaississement
d	A/MS	0,028 -	0,041 +	

Contraste de définition: - ABCD

Groupe de principe: 1, ab, ac, bc, ad, bd, cd, abcd

Groupe modèle: a, b, c, abc, d, abd, acd, bcd

Alias a:bcd ab:cd
b:acd ac:bd
c:abd ad:bc
d:abc l:abcd

TABLEAU I2 TABLEAU DES SIGNES ET TOTAL DES RÉACTIONS: MATIÈRES SOLIDES FLOTTANTES TOTALES

	Niveau du facteur				
	A	B	C	D	
Traitement No.	Produit chimique - = 0 mg/L + = 25 mg/L	Débit de l'affluent - = 45 L/min + = 684 L/min	Polymère - = 0,58 mg/g + = 1,37 mg/g	A/MS - = 0,028 + = 0,041	Réaction Σ Matières solides flottantes totales (%)
1 (a)	+	-	-	-	17,64
2 (b)	-	+	-	-	20,01
3 (c)	-	-	+	-	19,33
4 (abc)	+	+	+	-	22,28
5 (d)	-	-	-	+	19,87
6 (abd)	+	+	-	+	19,15
7 (acd)	+	-	+	+	22,91
8 (bcd)	-	+	+	+	21,42
					Σ 162,61

Calcul des effets:

A total = 17,64 - 20,01 - 19,33 + 22,28 - 19,87 + 19,15 + 22,91 - 21,42 = 1,35

Effet principal A = $\frac{1,35}{12}$ = 0,1125

TABLEAU I3 EFFETS TOTAUX ET ANALYSE DE LA VARIANCE

(1) Comparaison	(2) Total	(3) Effet = 2/12	(4) FSP	(5) MSS $2^2/24$
A	1,35	0,1125	3	0,0759
B	3,11	0,259	3	0,403
C	9,27	0,773	3	3,58
D	4,09	0,34	3	0,697
AB, - CD	-1,35	-0,1125	3	0,0759
AC, - BD	7,53	0,628	3	2,36
AD, - BC	0,19	0,16	3	0,0015
Total			21	7,193

Variance de l'erreur:

Un autre carré moyen est fourni par la variation entre les répétitions de chaque série de conditions. On l'obtient en faisant la différence entre

(A) la somme des sommes des carrés pour les $2^n - 1$ effets et

(B) le total des carrés de tous les $m \times 2^n$ observations individuelles.

Dans ce cas, $2^n - 1 = 2^3 - 1 = 7$

$m \times 2^n = 3 \times 2^3 = 24$

(A) = 7,193

$$(B) = (6,98^2 + 5,50^2 + \ldots + 7,19^2) - \frac{(162,61)^2}{24} = 14,0$$

$\therefore$ Variance de l'erreur = 14,0 - 7,193

= 6,807

$$\text{Carré moyen de l'erreur} = \frac{\text{variance de l'erreur}}{\text{FSP}}$$

où: FSP = FSP/classe x nombre de classes

= 2 x 8

= 16

$\therefore$ Carré moyen de l'erreur $= \frac{6,807}{16}$

$= 0,425$

La signification des sommes moyennes des carrés dans l'analyse de la variance doit être vérifiée par rapport au carré moyen de l'erreur du test de F.
Dans ce cas:

$\alpha = 0,05$

$\upsilon_1 = 3$

$\upsilon_2 = 16$

alors $F_{0,05}; 3,16 = 3,24$.

Ainsi, la valeur minimale du carré moyen pour un seuil de signification de 5% est $3,24 \times 0,425 = 1,377$.

L'effet principal C (addition du polymère) et l'interaction AC ou -BD sont significatifs. Comme les niveaux de d étaient discutables, on suppose que les effets pertinents sont C et AC.

TABLEAU I4 INTERACTION DE L'EFFET DU POLYMÈRE ET DU PRODUIT CHIMIQUE SUR LES MATIÈRES SOLIDES FLOTTANTES TOTALES

			C -	C +
			Faible dose du polymère	Dose élevée du polymère
A	-	Sans produit chimique	6,64	6,79
	+	Avec produit chimique	6,13	7,53

Conclusion:

On obtient les meilleurs résultats avec le produit chimique et une dose élevée du polymère. Avec une faible dose du polymère, l'addition du produit chimique a un effet nuisible.

B) Observations de l'effluent, totaux des réactions

C) Paramètre d'épaississement, totaux des réactions

Le tableau des signes est le même que pour la partie A, et les résultats pour B) et C) sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

TABLEAU I5 TOTAUX DES RÉACTIONS DES MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT ET DU PE

Traitement No.	Réaction, Σ matières solides en suspension dans l'effluent (mg/L)	Réaction, Σ PE
1 (a)	136	4782
2 (b)	155	5616
3 (c)	78	5262
4 (abc)	46	6621
5 (d)	236	5397
6 (abd)	84	7446
7 (acd)	63	6012
8 (bcd)	90	7722
	Σ888	Σ48855

TABLEAU I6 SOMME DES CARRÉS POUR L'ANALYSE DE LA VARIANCE. EFFLUENT ET PE

Comparaison	Effluent, somme des carrés	PE, somme des carrés
A	2204	62 208
B	793,5	1 476 096
C	4648	235 224
D	140,2	768 984
AB, - CD	0	14 701
AC, - BD	522,67	102 182
AD, - BC	682,67	1 442
	8991	2 598 629

TABLEAU I7 EFFETS SIGNIFICATIFS SUR L'EFFLUENT ET LE PE

	Effluent	PE
Carré au moyen de l'erreur	263	68811
Minimum de matières solides en suspension pour la signification	852	222948
Comparaisons significatives	A;C	B;D (C trop rapproché)

TABLEAU I8 INTERACTION DE L'EFFET DU POLYMÈRE ET DU PRODUIT CHIMIQUE SUR LES MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION DANS L'EFFLUENT

			C -	C +
			Faible dose du polymère	Dose élevée du polymère
A	-	Sans produit chimique	65	28
	+	Avec produit chimique	36	18

Conclusion:

Le produit chimique et le polymère améliorent de façon indépendante la qualité de l'effluent; on obtient un effluent de qualité optimale lorsqu'on ajoute le produit chimique et le polymère. L'interaction dans ce cas est minime.

TABLEAU I9 INTERACTION DE L'EFFET DU DÉBIT DE L'AFFLUENT ET DU A/MS SUR LE PE

			D -	D +
			A/MS faible	A/MS élevé
A	-	Débit faible	1674	1901
	+	Débit élevé	2039	2525

Conclusion:

L'augmentation du débit et du A/MS entraînent de façon indépendante une augmentation du PE; le PE est optimal lorsque le débit et le A/MS sont élevés. L'interaction dans ce cas est minime.

ANNEXE J

CALCULS PORTANT SUR L'ÉQUILIBRE DES MATIÈRES SOLIDES

USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 3

ANNEXE J CALCULS PORTANT SUR L'ÉQUILIBRE DES MATIÈRES SOLIDES. USINE PILOTE DE FLOTTATION SOUS PRESSION, PHASE 3

	Affluent			Écumoire		Matières solides flottantes					Erreur visant l'équilibre des matières solides (%)
Test	Débit (L/min)	Matières solides en suspension (mg/L)	Débit massique (g/min)	En marche (min)	En arrêt (min)	Total (mg/L)	Débit (L/min)	Débit/min en marche (L/min)	Débit massique (g/min)	Débit massique/min en marche (g/min)	
11	68,2	2627	179	10	2	71809	2,3	2,76	165	198	-3,4
12	68,2	3091	211	10	2	85498	2,4	2,85	205	246	-2,8
13	68,2	2912	198	10	2	65460	2,7	3,2	177	212	-10,6
17	68,2	3094	211	10	2	70804	1,1	1,32	78	94	
18	68,2	3107	212	10	2	60268	2,9	3,5	175	211	-17,5
19	45,5	2635	121	6	6	73133	1,8	3,6	132	264	+9,1
20	68,2	2971	203	10	2	67607	2,9	3,5	196	235	-3,4
21	45,5	3059	139	6	6	75935	1,7	3,4	129	258	-7,2
22	45,5	3249	148	6	6	61772	2,3	4,6	142	284	-4,0
24	68,2	2895	197	10	2	63577	3,1	3,7	197	236	0
25	68,2	2753	188	10	2	67668	2,3	2,76	156	187	-17,0
26	68,2	2757	188	10	2	74362	3,0	3,6	223	268	+15,7
27	68,2	2517	172	10	2	74601	2,3	2,76	172	206	0
28	68,2	2619	179	10	2	71867	1,8	2,2	129	155	-27,9
31	45,5	3385	154	8	2	60812	3,8	4,75	231	289	+33,3
38	45,5	3049	139	6	5	54098	2,1	3,85	117	208	-15,8
39	68,2	2725	185	10	2	57579	2,3	2,76	132	158	-28,6
41	45,5	3103	141	6	6	46383	1,06	2,1	49	98	
43	90,9	2669	243	Fonctionnement continu		65270	6,8	6,8	444	444	+45,3
44	90,9	3256	296	Fonctionnement continu		62522	4,8	4,8	300	300	+1,4
45	90,9	3435	312	Fonctionnement continu		59487	5,6	5,6	333	333	+6,3
										Moyenne	-1,6%
										σ	19,6

ANNEXE K

ESTIMATION DES COÛTS

ANNEXE K ESTIMATION DES COÛTS

Les facteurs sur lesquels l'estimation des coûts est basée sont présentés ci-dessous:

K1 Critères modèles

(a) Flottation de la liqueur mixte et des eaux d'égouts

La capacité des unités de flottation est établie selon le rendement de l'usine pilote (voir le tableau 38) qui indique les charges hydrauliques acceptables de la façon suivante:

	LM (AP) 4 600 mg/L	EE 220 mg/L	LM (BA) 2 900 mg/L
Charge hydraulique (m/h)	2,27	6,50	4,88

(b) Décantation de la liqueur mixte et des boues activées

La capacité des bassins de décantation est établie selon la pratique en vigueur au ministère de l'Environnement de l'Ontario.

	LM (AP) 4 600 mg/L	EE 220 mg/L	LM (BA) 2 900 mg/L
Vitesse de déversement (m/h)	0,61	0,82	0,82

(c) Épaississement par flottation des boues décantées

La capacité des épaississeurs avec flottation utilisés pour concentrer les boues secondaires provenant d'une usine d'épuration ordinaire par boues activées suppose une DBO de 0,08 kg/personne•j, 30 pour cent de la réduction de la DBO se faisant dans les boues primaires, et un facteur de croissance des boues de 0,65 (MSS/DBO enlevées). La respiration endogène est laissée de côté. On suppose des périodes de fonctionnement de 8,

16 et 24 heures par jour pour les usines de capacités de 4 500, 45 500 et 227 000 m^3/j respectivement pour obtenir l'estimation des coûts d'énergie pour les unités de flottation sous pression.

La capacité des épaississeurs avec flottation, utilisés pour concentrer les boues secondaires décantées provenant d'une usine d'épuration par aération prolongée, suppose que la production nette de boues sera la même qu'avec une usine d'épuration ordinaire par boues activées, c'est-à-dire que la charge excédentaire de DBO appliquée aux bassins d'aération, lorsque aucune boue primaire n'est utilisée, est contrebalancée par la perte des boues causée par la respiration endogène.

K2 Besoins en main-d'oeuvre

L'estimation des jours-personnes quotidiens nécessaires pour faire fonctionner l'équipement choisi est basée sur les renseignements provenant des exploitants des usines et des fournisseurs d'équipements. Le tableau K1 présente ces valeurs.

K3 Coûts unitaires

Les coûts unitaires pour les produits indiqués sont typiques des prix en vigueur en Ontario au mois d'octobre 1977. Lorsqu'il y a deux valeurs, la plus élevée s'applique au plus petit projet.

Main-d'oeuvre	7$ de l'heure
Énergie	3,1¢/kWh
Polymère	3,52$/kg (Percol 728, Percol 757)
Chlorure ferrique	18,79$/100 kg (base de 100%)
Entretien	1% du coût de l'équipement
Excavation	3,27$ à 3,92$/$m^3$
Béton:	222$ à 262$/$m^3$

Unités de flottation sous pression:

5 m^2 (50 pi^2)	50 000$ (y compris le bassin)
14 m^2 (150 pi^2)	70 000 (y compris le bassin)
23 m^2 (250 pi^2)	90 000 (y compris le bassin)
37 m^3 (400 pi^2)	130 000 (y compris le bassin)
74 m^2 (800 pi^2)*	130 000 (sans le bassin)
186 m^2 (2 000 pi^2)*	2000 000 (sans le bassin)

* Les coûts pour les bassins en béton coulés sur place font partie des coûts de construction.

TABLEAU K1 RÉSUMÉ DES BESOINS EN MAIN-D'OEUVRE POUR LA FLOTTATION ET LA DÉCANTATION

	Unités et heures-personnes par jour		
	4 500 m^3/j	45 500 m^3/j	227 000 m^3/j
Flottation de la LM (AP)	2 - 37 m^2 -	10 - 74 m^2 24	24 - 186 m^2 54
Flottation des EE	2 - 19 m^2 3	4 - 74 m^2 16	8 - 196 m^2 41
Flottation de la LM (BA)	2 - 19 m^2 3	5 - 74 m^2 6	10 - 186 m^2 41
Épaississement par flottation (AP ou BA)	1 - 5 m^2 1 1/2	2 - 14 m^2 3	2 - 37 m^2 5
Décantation terminale (AP)	2-6,1 m x 24m x 3,7m 1 1/4	10-6,1m x 50m x 3,7m 4	20-12m x 62m x 3,7m 12
Décantation primaire	2-5,4m x 21m x 3m 1 1/4	8-6,1m x 50m x 3m 3	16-12m x 59m x 3m 10
Décantation terminale (BA)	2-5,4m x 21m x 3,7m 1 1/4	8-6,1m x 50m x 3,7m 3	16-12m x 57m x 3,7m 10

Dispositifs de commande, systèmes d'alimentation en produits chimiques:

- compris dans les unités en acier préfabriquées;
- en surplus dans le cas des bassins en béton.

Constructions: 3,27$ à 4,58$/$m^3$ (seulement pour la structure)
4,25$ à 5,89$/$m^3$ (y compris pour les éléments mécaniques et électriques)

K4 Tailles des unités de flottation sous pression

La taille des unités de flottation sous pression destinées à la clarification primaire et terminale est établie selon les charges hydrauliques auxquelles les unités ont été continuellement soumises (voir Annexe K1).

La taille des unités de flottation sous pression utilisées pour l'épaississement par flottation est établie sur la base des hypothèses indiquées à l'Annexe K1 et les recommandations du fabricant sur la charge de matières solides, habituellement 9,8 $kg/m^2.h$.

L'usine d'épuration ordinaire par boues activées de 45 500 m^3/j illustrera la marche à suivre.

a) Clarification terminale

Charge hydraulique = 4,88 m/h = 117 m/j

Surface = $\frac{45\ 500}{117} = 388\ m^2$

À utiliser: cinq unités de 74 m^2 dans des bassins en béton.

b) Épaississement par flottation

Boues de déchet = 100 000 x 0,055 x 0,65 = 3 600 kg/j

Charge de matières solides = 9,8 $kg/m^2 \cdot h$ = 235 $kg/m^2 \cdot j$

Période de fonctionnement = 112 h par semaine de 168 h

Superficie = $\frac{3\ 600}{235} \times \frac{168}{112} = 23\ m^2$

À utiliser: deux unités en acier préfabriquées de 14 m^2 chacune.

K5 Besoins en main-d'oeuvre pour la flottation

Les valeurs estimées adaptées à partir des feuilles de données de Komline-Sanderson Engineering Corporation sont présentées au tableau K2.

TABLEAU K2 RÉSUMÉ DES BESOINS EN ÉNERGIE POUR LA FLOTTATION

	Puissance (kWh)			
	AP	EE	BA	EPF
Unité de 19 m^2				
Pompe de recirculation	22	21	31	22
Pompe de réaération	4,5	4,5	6	3,7
Collecteurs	0,6	0,6	0,6	0,6
Mélangeur du polymère et pompe à polymère	1,1	1,1	1,1	1,1
Compresseur d'air	1,1	0,6	0,6	2,2
TOTAL	29	28	39	30
Unité de 37 m^2				
Pompe de recirculation	42	42	63	37
Pompe de réaération	9	9	12	7
Collecteurs	1,3	1,3	1,3	1,3
Mélangeur du polymère et pompe à polymère	1,1	1,1	1,1	1,1
Compresseur d'air	1,9	0,7	0,7	3,7
TOTAL	55	54	78	50
Unité de 74 m^2				
Pompe de recirculation	75	75	119	56
Pompe de réaération	19	19	30	15
Collecteurs	2,2	2,2	2,2	2,2
Mélangeur du polymère et pompe à polymère	1,1	1,1	1,1	1,1
Compresseur d'air	3,7	1,5	1,5	7
TOTAL	101	99	154	81
Unité de 186 m^2				
Pompe de recirculation	224	224	336	130
Pompe de réaération	56	56	84	37
Collecteurs	3,7	3,7	3,7	3,7
Mélangeur du polymère et pompe à polymère	1,5	1,5	1,5	1,5
Compresseur d'air	11	4,5	4,5	22
TOTAL	296	290	430	194

K6 Coûts afférents à la flottation et à la décantation (usine d'épuration par boues activées de 45 500 m^3/j)

L'estimation suivante est présentée en détails afin d'illustrer la façon dont ont été déterminés, à l'aide des renseignements susmentionnés, les coûts de construction de trois usines de tailles différentes.

Travaux non compris

L'estimation des prix porte sur les coûts de construction sans le terrain. On ne tient pas compte des frais de génie et légaux, des coûts administratifs ou des frais d'emprunt qui pourraient représenter 20 pour cent des coûts de construction. De même, on n'a pas tenu compte d'une part proportionnelle pour le travail sur le chantier, les assurances ou les cas imprévus (qui augmenteraient les coûts de 10 à 15 pour cent). L'estimation ne comprend pas les coûts afférents aux pompes d'alimentation et d'effluent pour la flottation sous pression (ou épaississement par flottation) et aux pompes de boues primaires ou de boues activées (pour la décantation primaire et terminale).

1) Flottation de la liqueur mixte (2 900 mg/L)

Coût en capital

(a)	Unités de flottation (74 m^2)	
	Fournir 5 à 130 000$	650 000$
	Installation, 10%	65 000
(b)	Bâtiment (1 490 m^2)	
	Excavation et remblayage	
	Finitions architecturales	
	Toiture	
	Béton (y compris les bassins de flottation sous pression)	
	Grues, monorails, monte-charge	1 200 000$
(c)	Éléments mécaniques et électriques	
	Chauffage et ventilation	
	Pompes et soupapes	
	Plomberie	
	Canalisation électrique et sous-station	600 000

(d) Système d'alimentation du polymère (sec et liquide)

Approvisionnement et installation 273 000

(e) Dispositifs de contrôle automatiques 190 000

Total 2 978 000$

Coût d'exploitation

(a)	Énergie:	154 kW x 5 x 268$/kW/an	206 000
(b)	Main-d'oeuvre:	16 h x 365 x 7$/h	41 000
(c)	Entretien:	1% du coût afférent à la flottation sous pression	6 500
(d)	Polymère:	1,45 mg/g à 3,52$/kg	237 000
(e)	$FeCl_3$:	25 mg/L à 18,79$/100 kg	228 000
		Total	718 500$

2) Décantation terminale (6,1 m x 47,5 m x 3,7 m)

Coût en capital (8 bassins)

(a) Escavation:

Blindage, emmagasinage de la terre, assèchement 36 000

(b) Béton:

Façonnage et mise en place
Acier d'armature
Déversoirs, goulottes, réseau 333 000

(c) Équipement:

Approvisionnement et installation
Collecteurs, collecteurs transversaux
Moteurs, mécanismes d'entraînement,
écumoires 656 000

Total 1 025 000$

Cout d'exploitation

(a)	Énergie;	1,1 kW x 8 x 268$/kW/an	2 400
(b)	Main-d'oeuvre:	3 h x 365 x 7$/h	7 700
(c)	Entretien;	1% du coût en capital	10 000
		Total	20 100$

3) Épaississement par flottation

Coût en capital

(a) Unités de flottation (14 m^2)

Fournir deux unités de 14 m^2 à 70 000$ chacune	140 000

(b) Bassin de retenue (4,6 m x 7,6 m x 4,6 m)

Excavation	
Béton et armature	
Système d'aération	19 000

(c) Bâtiment (186 m^2)

Architecture, structure	
Mécanique, électricité	249 000$
Total	422 000$

Coût d'exploitation

(a)	Énergie:	26 kW x 24 h/j x 268$/kW/an	4 700
(b)	Main-d'oeuvre:	3 h x 365 x 7$/h	7 700
(c)	Entretien:	1% du coût afférent à la flottation sous pression	1 400
(d)	Polymère:	(1,25 mg/g)	5 800
		Total	19 600$

RÉSUMÉ DES COÛTS

L'estimation des coûts résumée ci-dessous vise les unités indiquées de cette façon:

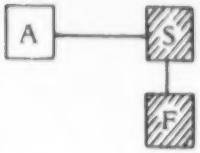
P = décantation primaire
A = aération
S = décantation secondaire
F = flottation

Autres options envisagées

1. Aération prolongée (4 600 mg/L)

(a)

(b)



2. Eaux d'égouts brutes (220 mg/L)

(a)

(b)

3. Boues activées (2 900 mg/L)

(a)

(b)

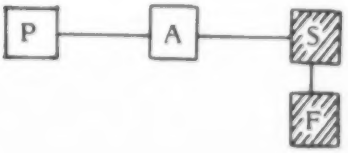


TABLEAU K3 RÉSUMÉ DES COÛTS EN DOLLARS

		4 500 m^3/j	45 500 m^3/j	227 000 m^3/j
Coûts en capital				
1 (a)	Flottation (AP)	670 000	5 484 000	22 680 000
(b)	Décantation secondaire	172 000	1 313 000	5 752 000
	Épaississement par flottation	121 000	422 000	676 000
		293 000	1 735 000	6 428 000
Coûts d'exploitation				
1 (a)	Flottation (AP)	45 400	345 000	2 100 000
	Polymère	24 200	242 000	1 210 000
		69 600	587 000	3 310 000
(b)	Décantation secondaire	5 800	28 000	119 000
	Épaississement par flottation	4 200	13 300	29 000
	Polymère	600	5 800	29 200
		10 600	47 100	177 200
Coûts en capital				
2 (a)	Flottation (EEB)	390 000	2 437 000	9 330 000
(b)	Décantation primaire	125 000	965 000	4 260 000
Coûts d'exploitation				
2 (a)	Flottation (EEB)	23 300	181 000	901 000
	Polymère	2 600	26 000	130 000
		25 900	207 000	1 031 000
(b)	Décantation primaire	4 500	19 700	82 600
	Polymère	2 600	26 000	130 000
		7 100	45 700	212 600
Coûts en capital				
3 (a)	Flottation (BA)	390 000	2 978 000	11 000 000
(b)	Décantation secondaire	134 000	1 025 000	4 500 000
	Épaississement par flottation	121 000	422 000	676 000
		255 000	1 447 000	5 176 000
Coûts d'exploitation				
3 (a)	Flottation (BA)	21 000	253 500	1 275 000
	Polymère	23 700	273 000	1 185 000
	Chlorure ferrique	22 800	228 000	1 140 000
		68 200	718 500	3 600 000
(b)	Décantation secondaire	5 100	20 300	104 000
	Épaississement par flottation	4 200	13 300	29 000
	Polymère	600	5 800	29 200
		9 900	39 400	162 200